



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工学博士 學位論文

연료전지 기반의 소형선박용 추진시스템에 관한 연구

A Study on the Fuel Cell based Small Ship Propulsion System



韓國海洋大學交 大學院

메카트로닉스 공학과

梁 香 權

本 論文을 梁香權의 工學博士 學位論文으로 認作함.

委員長 柳 熙 漢



委 員 吳 珍 錫



委 員 蘇 明 玉



委 員 李 相 得



委 員 郭 俊 浩



2015 年 12 月 24 日

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Tables	3
List of Figures	4
Nomenclatures	7
Abstract	9
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	4
1.3 연구 내용 및 구성	7
제 2 장 연료전지 선박	9
2.1 연료전지 선박 설계	9
2.2 연료전지 선박 시스템 배치	11
2.3 연료전지 룸 Vent 시스템	15
제 3 장 연료전지 시스템	28
3.1 선박용 연료전지 시스템	28
3.1.1 연료전지 개념과 종류	28
3.1.2 연료전지의 구성	31
3.1.4 연료전지의 시스템 선정	38
3.2 선박용 연료전지 전력 시스템	43
3.2.1 연료전지 전력시스템	43
3.2.2 연동전력 시스템	52
제 4 장 연료전지 선박 전력시스템 시뮬레이션	73
4.1 연료전지 시뮬레이션	73
4.1.1 활성화 손실	76
4.1.2 농도손실	78
4.1.3 저항손실	79
4.1.4 연료전지 모델링	80

4.2 컨버터 시뮬레이션	82
4.3 배터리 시뮬레이션	84
4.5 연료전지 선박 통합 시뮬레이션	86
4.6 연료전지 선박 통합 시뮬레이션 결과 분석	88
 제 5 장 연료전지 선박 건조, 운항 및 데이터 결과 분석	90
5.1 연료전지 선박 건조 및 운항	90
5.1.1 콘솔 설계	90
5.1.2 연료전지 선박용 시스템	92
5.2 데이터 결과 분석	96
5.2.1 추진 모터 제어시스템	97
5.2.2 추진전력 연동 시스템	98
 제 6 장 결 론	103



List of Tables

Table. 1.1 World energy consumption	4
Table. 1.2 Projects for fuel cell ship[16]	5
Table. 2.1 Ship specifications	11
Table. 3.1 Types and features of fuel cell	30
Table. 3.2 Specifications of NI-cRIO 9068	45
Table. 3.3 I/O configuration	46
Table. 3.4 I/O Module & Specification	46
Table. 3.5 Fuel cell signal	52
Table. 3.6 Communication protocol between fuel cell and central controller	53
Table. 3.7 Communication protocol for BMS	57
Table. 3.8 Communication signal between battery and central controller	60
Table. 3.9 PMS communication signal	63
Table. 4.1 DC/DC converter specification	82
Table. 4.2 Battery specification	84
Table. 5.1 Ship test information	95

List of Figures

Fig. 1.1 The amount of renewable energy[13]	3
Fig. 1.2 PSS, Saver fin, Thrust fin	6
Fig. 2.1 Result of analysis for the performance 50 ships data	9
Fig. 2.2 Figure and inner view of mother ship	10
Fig. 2.3 Calculation of passenger space	12
Fig. 2.4 Layout of passenger space	13
Fig. 2.5 Arrangement of the system	14
Fig. 2.6 Arrangement of the all system	14
Fig. 2.7 Volume of fuel-cell stack room	18
Fig. 2.8 Flow analysis illustrates how using CFD	19
Fig. 2.9 Stack room analysis model	22
Fig. 2.10 Stack room flow boundary conditions	23
Fig. 2.11 Boundary conditions for stack room leakage	23
Fig. 2.12 Interpretation area volume mesh	24
Fig. 2.13 flowing lines in stack room of outlet forced discharge ventilation condition	25
Fig. 2.14 flowing lines in stack room of inlet forced discharge ventilation condition	25
Fig. 2.15 Vertical velocity distribution in stack room of outlet forced discharge ventilation condition	26
Fig. 2.16 Vertical velocity distribution in stack room of inlet forced discharge ventilation condition	26
Fig. 2.17 Vertical velocity distribution of CFD when stack room H^2 leaked	27
Fig. 3.1 Principle of fuel cell	28
Fig. 3.2 Air supply system of fuel cell	32
Fig. 3.3 Hydrogen supply system of fuel cell	33
Fig. 3.4 Configuration of fuel cell system	34
Fig. 3.5 Configuration of fuel cell power system for DC power supply	36
Fig. 3.6 Configuration of fuel cell power system for AC power supply	37

Fig. 3.7 Configuration of fuel cell power system for ship	38
Fig. 3.8 Parallel hybrid power system	39
Fig. 3.9 Series hybrid power system	40
Fig. 3.10 Parallel energy source power system	40
Fig. 3.11 Power system using the bi-directional DC/DC converter	41
Fig. 3.12 Power system using the super-capacitor	42
Fig. 3.13 Fuel cell ship system diagram	43
Fig. 3.14 Compact RIO system diagram	44
Fig. 3.15 NI-cRIO 9068	45
Fig. 3.16 Signal diagram	50
Fig. 3.17 Central controller diagram	51
Fig. 3.18 Communication signal between fuel cell and central controller	54
Fig. 3.19 Fuel cell communication program	55
Fig. 3.20 GUI monitor for fuel cell	55
Fig. 3.21 Communication diagram for BMS	57
Fig. 3.22 BMS CAN2.0B protocol for Li-ion battery	59
Fig. 3.23 BMS data communication program	61
Fig. 3.24 GUI monitor for BMS	62
Fig. 3.25 Communication protocol for PMS	64
Fig. 3.26 Load analysis of ship(1)	65
Fig. 3.27 Load analysis of ship(2)	66
Fig. 3.28 UPS capacity calculation based on ship load analysis	67
Fig. 3.29 Operating procedure fuel cell ship	68
Fig. 3.30 GUI monitor for PMS	69
Fig. 3.31 Control of propulsion system	71
Fig. 3.32 Control diagram of propulsion system	71
Fig. 4.1 Polarization curve of fuel cell	73
Fig. 4.2 Activation loss for effect of exchange current density	77
Fig. 4.3 Activation loss for effect of the transfer coefficient	77
Fig. 4.4 Concentration loss for current density	79
Fig. 4.5 Ohm loss for current density	80
Fig. 4.6 Block diagram for fuel Cell modeling	81
Fig. 4.7 I-V Curve of fuel cell	81

Fig. 4.8 I-P curve of fuel cell stack(146cell)	82
Fig. 4.9 Modeling(1) for DC/DC boost converter	83
Fig. 4.10 Modeling(2) of DC/DC boost converter	83
Fig. 4.11 Block diagram of load generation for fuel cell ship	85
Fig. 4.12 Front panel of load generation for fuel cell ship	85
Fig. 4.13 Block diagram of fuel cell ship simulation	86
Fig. 4.14 Front panel of simulation for fuel cell ship	87
Fig. 4.15 Load and power graph of Fuel cell ship 1	88
Fig. 5.1 Configuration of console	90
Fig. 5.2 Configuration of central console panel (1)	91
Fig. 5.3 Configuration of central console panel (2)	91
Fig. 5.4 Configuration of central console panel (3)	92
Fig. 5.5 Figure of inner electronic system installation	93
Fig. 5.6 Figure of hydrogen tank system installation	93
Fig. 5.7 Figure of fuel-cell system installation	94
Fig. 5.8 Figure of console	95
Fig. 5.9 Sea trials	96
Fig. 5.10 Propulsion motor RPM-Power curve	97
Fig. 5.11 Propulsion motor control for telegraph signature	98
Fig. 5.12 Inverter control curve	99
Fig. 5.13 Fuel cell output power curve	100
Fig. 5.14 BMS output power curve	101

Nomenclatures

ρ	: 밀도
U, V, W	: 3축에 대한 방향
ε	: 소산률
k	: 난류운동에너지
G_k	: 평균속도 구배에 의한 난류 운동에너지
G_b	: 부력에 의한 난류 운동에너지
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$: 난류 Prandtl 수
S	: 평균 변형률 계수
μ_t	: 난류점성도
ΔG	: Gibbs 자유에너지 변화량
ΔH	: 연료전지 생성물과 반응물의 열차이
T_f	: 연료전지의 화학 반응 온도
ΔS	: 연료전지의 생성물과 반응물의 엔트로피 차이
$E_{T,P}$: 연료전지의 온도와 압력 함수의 이상적 전위차
R	: 기체상수
F	: 패러데이 상수
n	: 연료전지 화학반응에 참여하는 전자 수
P_{H_2}	: 연료전지의 수소분압
P_{O_2}	: 연료전지의 산소분압
P_{H_2O}	: 연료전지의 물 분압
E_{fc}	: 연료전지 손실을 반영한 분극화 전압
α	: 연료전지 전달 계수
i_f	: 연료전지 출력 전류
i_c	: 연료전지 교환전류밀도
i_{lo}	: 연료전지 전류 손실
i_L	: 연료전지 한계전류밀도
i_{ref}	: 연료전지 촉매 단위표면적당 기준 교환전류밀도

C	: 반응물의 농도
δ	: 기체 확산두께
D^{eff}	: 촉매층 유효 확산계수
C_R^0	: 평균 반응물 농도
R	: 연료전지 내부저항
V	: 전압
E_{thermo}	: 연료전지의 열역학적 전압
n_{act}	: 연료전지 반응속도에 따른 활성화 손실
n_{ohmic}	: 연료전지 이온과 전자 저항으로 인한 저항 손실
n_{conc}	: 연료전지 이온과 전자 수송에 따른 농도 손실



A Study on the Fuel Cell based Small Ship Propulsion System

Hyang Kweon, Yang

Department of Mechatronics Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

This fuel cell ship, which is designed and constructed through this study, is the first ship in Korea to apply hybrid propulsion system based on fuel cell. And also, Integrated control system, PMS, BMS are developed to apply the fuel cell based hybrid propulsion system in the ship.

As the usage of fossil energy is increasing rapidly, the climate change becomes intensified due to the greenhouse gas. United Nations Framework Convention on Climate Change adopted at UN Conference on Environmental and Development in 1992. And the Kyoto Protocol which includes the detailed implementation plan was effectuated. Even in Korea, the development of the relative technique is clearly needed because of the CO₂ emission regulation might move back to 2018 faster than

expected.

The amount of CO₂ emission from ships is about 30 billion tons per year world widely. The ships', which use fossil fuel, the amount of CO₂ emission is about one billion ton, which corresponds to 3.3% of 30 billion tons. In relation to this matter, Marine Pollution Treaty (MARPOL) has tightened up. The development of the low-pollution and eco-friendly ship is urgently needed because the present diesel engines for propulsion cannot satisfy the regulations of emission.

Due to those situations, many of freight and transportation companies hastened to develop their technology to satisfy the environment regulation. Especially on the inland waters of EU, the measure, that make fossil fuel ships are not allowed to sail, is preparing, therefore the studies of using electric propulsion system of ship have been continued.

The fuel cell ship is now being used widely in European countries, where cabin cruisers are used for tourists along the river. The boat may be used at the center of the city because of no exhaust gas, and also the electric propulsion system mitigated seasickness, which comes with vibration, noise, and the smell of gas. So people of all ages and both sexes are comfortable.

Based on the above advantages, it is expected that the cabin cruiser ships are sailing slowly for passenger's pleasure and using as floating home, café, and restaurant, etc.

Korea should decrease 10% of CO₂ emission quantity every five(5) years form 2015 like 10% on 2015, 20% on 2020, and 30% on 2025. In some degree, it might be possible to follow the regulation with short and mid-term plans however there is no way to pass completely the regulation, which will be strengthening, without energy efficiency and greenhouse gas emissions reduction technology, and it is urgently needed

to develop related technology and this situation makes us to develop advanced technology to meet regulations.

Fuel cell is an equipment of conversion from chemical energy of hydrogen which is main resources of energy to electrical energy. The electrical energy of fuel cell is caused by chemical reaction between hydrogen and oxygen and generating efficiency is generally about 30~40%, thermal efficiency is over than 40%. Therefore, it is to have a high efficiency of about 70~80% and it is expected to replace the existing heat engines if when it is co-generated. Unlike the heat engines are based on fossil fuel to generate the exhaust gas which causes environmental pollution, the fuel cell battery reduces considerably the risk of environmental contamination because it discharge unreacted water and air after chemical reaction between hydrogen and oxygen, instead of exhaust gas. It is easy to operate fuel cell system and maintenance, since it has no mechanical movement, also it can expect for a long service life.

Thus fuel cell is the eco-system aligned with the international circumstances and has the characteristic of high efficiency. Many studies have been made with respect to the application plan and control direction of fuel cell and furthermore, fuel cell research for the ship is actively proceeding.

This study is conducted laying emphasis on the commercialization of the fuel cell ship using the electric power generated from fuel cell as propulsion electric power. The fuel cell ship can solve environmental problems by using environment-friendly energy and can make system of the boat lightweight and simple, because the auxiliary equipment necessary to operate internal combustion engines, are not necessary. But, it is very difficult to apply the fuel cell on ships that electric power load can be changed rapidly because it does not have characteristics to follow the electric power load variation immediately in a short time. Therefore,

this study for ship power system as a propulsion system based on fuel cell that can make ship be operated stably and performed to solve this problem.

For the purpose this study, it is to compare and analyze the characteristic of the fuel cell ship by designing and manufacturing fuel cell and propulsion/power system of hybrid small ship connecting the battery that can supplement the weakness of fuel cell, by aiming technical development and commercialization of low-carbon Green Ship using fuel cell as the main propulsion system.

This study performed the whole system configuration necessary for operating ship at actual sea state, the hybrid propulsion configuration and operation program and operation simulation of electric power system and performance verification and designing and construction of fuel cell ship.

And also this study propose the operating and control plan of fuel cell system, through the analysis of actual sea trial result and simulation data, and subjects to be settled.

KEY WORDS : PMS(Power Management SYstem) 전원관리 시스템; Rechargeable Battery 이차전지; Generator efficiency 발전기 효율; Ship Energy 선박에너지; ESS(Energy Storage System) 에너지 저장장치

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

근래 전 세계적으로 환경문제가 심각해지자 환경문제 대책이 주요한 테마로 등장하였고, 각 방면에서 그 대책이 검토되기 시작하였다. 이러한 환경문제에 대응하기 위해 1989년에 ‘오존층을 파괴시키는 물질에 대한 몬트리올 의정서’ 발효, 1992년에 ‘기후 변화에 관한 유엔 기본협약’ 체결, 1994년에 ‘사막화 방지협약’ 채택, 2005년에는 ‘교토 의정서’가 공식 발효되었다. 이들은 점점 커지는 환경 문제가 더 이상 국가적 차원에서 해결할 것이 아니라, 세계적인 차원에서 해결해야 할 사안이라는 것을 시사한다. 오늘날 세계 시장에서 환경이라는 요소가 하나의 주요 테마로 자리매김한 것이다[1,2].

이에 따라 여러 전문가들은 다양한 방면에서 그 해결책을 찾고 연구하고 있다. 이산화탄소와 메탄 등의 온실가스(GHG: Green House Gas)로 인한 지구 온난화, 플론과 할론 등에 의한 오존층 파괴는 더 이상 선진국들만의 문제가 아닌 세계적인 규모에서의 대처가 필요한 중요한 문제가 되어버렸다. 그 대안으로서 최근에는 태양광, 태양열, 풍력 등의 재생에너지, 내연 기관과 배터리를 동시에 장착한 하이브리드 자동차, 수소를 연료로 사용하는 연료전지 등이 기존의 화석 연료를 대체할 새로운 연구 주제로 부각되고 있다. 특히 연료전지는 전기, 전자, 기계 등의 산업적인 분야에 국한되지 않고 주택, 자동차에도 적용할 수 있다. 또한 오염물질이나 유독성 물질을 배출하지도 않아 삶에 밀접한 영향을 주는 혁신적인 변화를 초래할 것으로 보인다[2]. 무엇보다 세계 물류 시장의 80%를 감당하는 선박에도 연료전지를 적용하려는 시도가 이루어지고 있는 것은 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라에서 특히 주목해야 할 점이다 [1,2,4,5,6]. 해상에서도 친환경적인 에너지를 사용해야 하며, 선박으로부터 배출

되는 질소산화물(NOx)과 황산화물(SOx) 등의 선박 배기가스를 규제해야 한다는 목소리가 유럽, 미국 등 주요 선진국에서 시작해 이제는 세계적인 추세로 확대되었다는 것이 이것을 뒷받침하고, 더욱이 국제해사기구(IMO : International Maritime Organization)에서도 여러 규정을 강화하여 해상에서 배출되고 있는 선박 배기가스들을 현 배출량 대비 80% 이하로 낮추고, 탄소가스 배출에 따른 세금 부과를 의무화하는 등 환경오염을 적극적으로 규제하고 있는 실정이다 [3,7].

이런 추세에 힘입어 수소를 주 에너지원으로 사용하는 연료전지가 기존의 화석연료를 기반으로 하는 열기관 패러다임을 무너뜨리고 새로운 시대를 열게 될 차기 주자로 각광받고 있다. 연료전지는 주 에너지원인 수소의 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 장치이다. 연료전지의 전기에너지는 수소와 산소의 화학반응에 의해 발생하며, 이론상으로는 열기관이 가지는 카르노 효율의 영향을 받지 않아 높은 효율로 전기에너지 발전이 가능하다. 연료전지의 발전 효율은 통상 30~40% 이고 부수적으로 발생하는 열효율이 40% 이상이므로, 이들을 병합하여 발전할 경우 총 70~80% 정도의 효율을 가지게 되어 기존의 열기관들을 대체할 수 있을 것으로 기대를 모으고 있다. 화석연료를 기반으로 하는 열기관들이 환경오염을 유발하는 배기가스를 발생시키는 것과는 달리, 수소와 산소의 화학반응 이후에는 배기가스 대신 미반응 공기와 물만을 배출시키기 때문에 환경오염의 우려가 현격하게 줄어들고, 연료전지 시스템을 구성하는 데는 기계적으로 운동하는 부분이 없어 운영 및 관리에도 용이하며 긴 수명을 기대할 수 있다[4].

이와 같이 연료전지는 국제정세에 부합하는 친환경적이면서 발전 효율이 높은 특성을 가진다. 이러한 연료전지 활용방안 및 제어방향에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있으며, 나아가 선박에 연료전지 활용방안에 대하여 연구가 활발히 이루어지고 있다[5~12]. 연료전지선박은 청정의 동력 발생장치인 연료전지를 사용하여 탄소가스 배출이 없으므로 국제 환경오염 규제에 적극적으로 대응할 수 있고, 기존의 열기관보다 발전 효율이 높아 향후 열기관을 대체한다면 세계 화석 연료의 고갈에 대비할 수 있어 미래 에너지 확보에도 대처할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 대형 선박에서는 보조 발전기를 대체할 수 있고,

모듈화가 가능하여 설치 및 교체가 상대적으로 용이한 것도 큰 강점으로 작용한다. 이는 반도국가인 우리나라의 조선·해운업계가 향후에도 국제적인 입지를 굳히고 유지하는 데 이바지할 미래 핵심기술로서 특별히 우리나라에서 주목해야 할 기술이다[4,6].

하지만 세계가 주목하는 추세에도 우리나라 정부와 국내 업계의 투자·개발은 미흡한 실정이다. 이에 따라 세계경쟁에서 우위를 차지하기 위해 신재생에너지에 대한 투자가 활발히 이루어져야 할 것으로 판단된다. 특히, 우리나라는 천연자원 빈곤국으로서 원료의 해외 의존도가 높다. 이는 향후 화석연료의 사용량을 지속적으로 줄이고 환경 친화적인 에너지원을 연구·개발하려는 국제적인 추세에 역행하는 것이며, 화석연료의 고갈 시기가 다가오는 시점에서 자원 빈곤국으로서 바라보아야 할 방향이 아님이 자명하다. 따라서 우리나라도 국제정세에 발맞추어 미래의 새로운 에너지 패러다임을 열게 될 연료전지 시장에 적극적으로 투자하고 관련 전문가들을 길러내야 한다. Table 1.1은 OECD국가별 신재생에너지 비율을 나타내고 있다. Fig. 1.1과 같이 우리나라는 주요 선진국에 비하여 신재생에너지 비율이 매우 낮음을 확인할 수 있다.

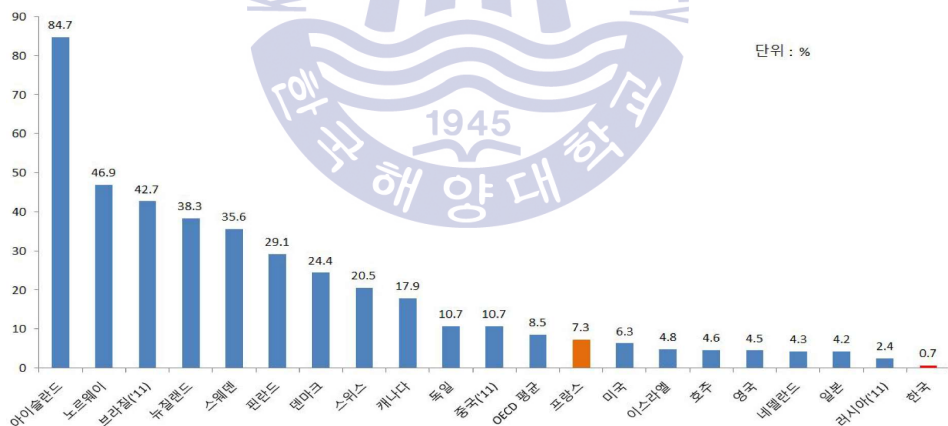


Fig. 1.2 The amount of renewable energy [13]

본 논문에서는 연료전지에서 생성된 전력을 주 추진 전력 원으로 사용하는 연료전지선박에 대하여 연구를 진행하고자 한다. 연료전지선박은 높은 효율로 환경문제를 해결할 수 있으며, 내연기관 사용에 필요한 보조기기들의 장비가 불필요하게 됨으로서 경량화, 시스템의 단순화를 할 수 있다는 장점을 지닌다.

그러나 연료전지는 급변하는 전력 부하변동에 강인하게 대처할 수 없는 특성을 지니기 때문에 짧은 순간에 급격한 전력 부하가 변동되는 선박에 적용하기 매우 어렵다. 따라서 이를 해결하기 위해 안정적으로 운항이 가능한 연료전지 기반의 추진시스템을 갖는 선박 전력시스템에 대하여 연구가 필요하다[14~16].

Table 1.1 World energy consumption (에너지경제연구원, 2000. 10)

순위	1차에너지소비 (백만TOE)	석유소비 (천 b/d)	에너지수입 (백만TOE)	석유수입 (백만톤)
1	미국 (2,204.9)	미국 (18,490)	미국 (547.2)	미국 (481.7)
2	중국 (752.6)	일본 (5,650)	일본 (401.0)	일본 (217.6)
3	러시아 (607.8)	중국 (4,370)	독일 (214.7)	한국 (113.7)
4	일본 (507.4)	독일 (2,825)	이태리 (141.3)	독일 (108.0)
5	독일 (330.9)	러시아 (2,535)	한국 (141.1)	이태리 (91.2)
6	인도 (276.4)	한국 (2,165)	프랑스 (132.0)	프랑스 (89.0)
7	프랑스 (252.4)	프랑스 (2,045)	스페인 (88.6)	네덜란드 (61.7)
8	캐나다 (227.8)	인도 (2,010)	대만 (64.4)	스페인 (60.7)
9	영국 (224.4)	이태리 (1,955)	브라질 (56.1)	싱가폴 (56.0)
10	한국 (182.0)	브라질 (1,805)	벨기에 (51.7)	영국 (50.0)
한국순위	10위	6위	5위	3위

1.2 연구동향

온실가스로 인한 지구 온난화 문제와 에너지 고갈의 문제 등이 국제적인 이슈가 되면서 신재생에너지관련 사업이 많은 주목을 받고 있다. 신재생에너지중 수소에너지를 이용한 연료전지는 온실가스 배출 규제 및 방지를 위한 국제협약에서 규정된 여러 사항에 부응할 수 있는 새로운 에너지원이다. 지난 1997년 12월, 일본 교토에서 개최된 기후변화협약 제3차 당사국 총회에서 채택된 ‘교토 의정서’에서 Annex I에 분류된 선진국들은 이때부터 연료전지 연구·개발에 본격적으로 착수하였고, 최근에는 실생활에 적용할 수 있는 실험을 진행하거나 이미 마친 상태에 이르렀다. 대표적으로 연료전지를 선박에 적용한 프로젝트들이 있는데, 이는 국제해사기구의 강력한 규제에 따른 결과로서 육상에서의 온실가스 배출량을 감축하려는 국제적인 노력에 발맞추어 언젠가 조선·해

운 분야에도 적용될 수밖에 없는 것이었다.

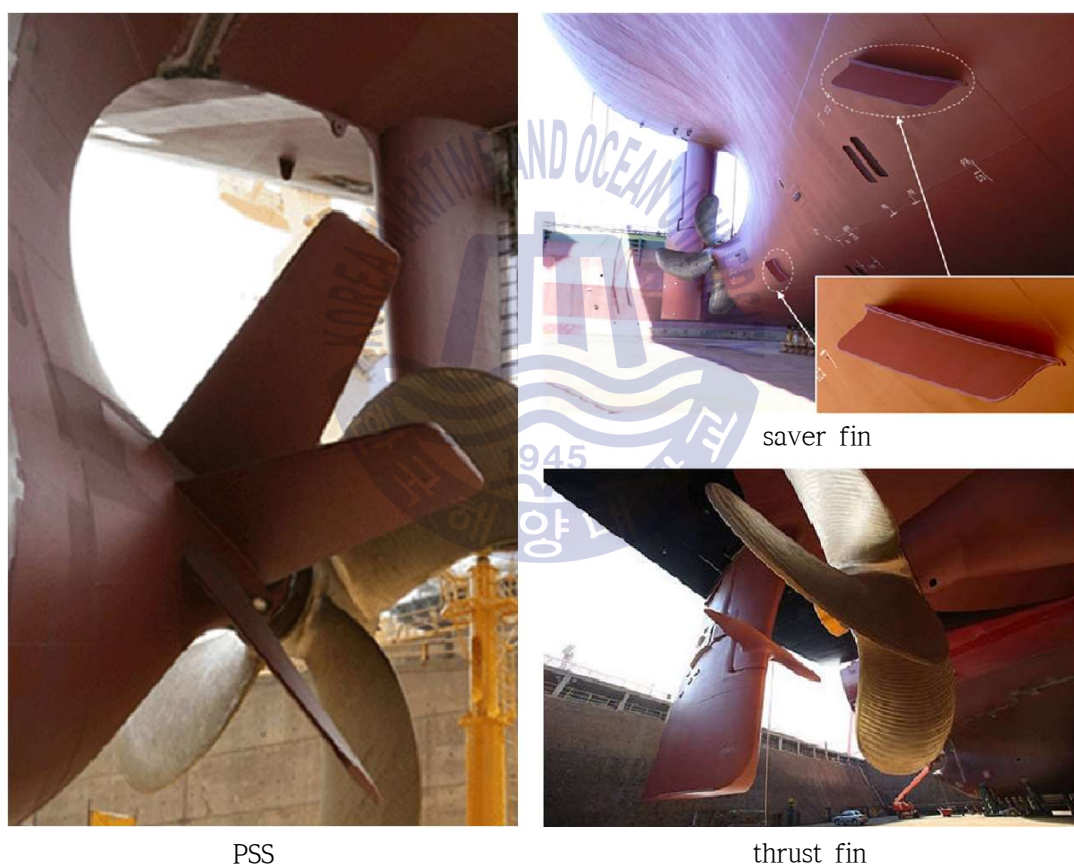
Table 1.2 Projects for fuel cell ship [16]

프로젝트	국가	연료전지 출력 [kW]	연료전지 종류	기 간	용 도
Fellow Ship	Norway	330	MCFC	2003~2010	OSV
Fuel Cell boat	Netherlands	60~70	PEMFC	~2007	소형통근선
Methapu	Finland	250	SOFC	2006 ~ 2009	자동차운반선
MC WAP	Italy	500	MCFC	2005 ~ 2010	선박용 연료개질
ZEM Ship	Germany	100	PEMFC	2006 ~ 2010	100인승 연료전지 유람선
e4Ship	EU	350~500	MCFC	2009 ~ 2016	친환경 선박 개발 Project
Elding	Iceland	-	PEMFC	2007 ~ 2010	고래탐사선
Zero CO ² Sailboat	France	25	PEMFC	~2010	Sailboat
Marti	Turkey	8.5	PEMFC	2008 ~ 2011	8인용 Boat
SSFC	United States of America	25,000	MCFC	2003 ~ 2009	군사용
NYK Super Eco Ship	Japan	40,000	MCFC/SOFC	2009 ~ 2030	미래형 선박 개념 설계

선박용 연료전지 개발은 주로 유럽과 미국을 중심으로 활발하게 진행되어 왔으며, 10년 이상의 연료전지 시스템 및 연계 기술 개발경험을 보유하고 있다. Table 1.2에서 알 수 있듯이 해외의 연료전지 선박 프로젝트 중 상당수는 이미 완료되었고, 실제 선박 제작과 운용을 포함하는 단계에 접어든 것으로 보인다. 또한 연료전지 자체만이 아니라 수소탱크, 스택, 전극, 기타 보조기기 등의 설비와 기자재, 운항 시스템 개발 등을 함께 진행하여 종합적인 상용화에 중점을 두고 있다. 여기에 선박의 폐열 회수와 여러 기기들의 시스템 최적화 연구 및 기술들을 더하여 미래형 선박의 패러다임을 열어갈 것으로 보인다. 과거에 조선 산업을 주도했었던 유럽, 일본 등의 선진국들은 환경규제와 같은 현재의 정세를 다시 한 번 주도권을 잡을 수 있는 기회로 보고 있는 것이다[16].

반면 국내의 연구·개발 현장은 해외에 비해 뜨겁지 않은 편이다. 연료전지 분야에 뒤늦게 발을 들인 우리나라는, 해외 수·출입의 대부분을 선박이 담당

하는 반도 국가이지만 선박용 연료전지를 연구한 사례가 의외로 많지 않다. 우리나라는 선박을 통한 수·출입이 주를 이루기 때문에 국제적인 규제가 강해질수록 직격탄을 맞을 확률이 크며, 관련 업계들은 이에 대한 대응책을 모색하고 있다. 그 일환으로 국내 조선업계에서는 단기적인 계획으로서 선형을 개조하거나 부가물을 장착·설치함으로써 선박의 추진효율을 개선하여 최종적으로 배기가스 배출량을 줄이는 방법을 검증하여 실제 선박에 적용하고 있다. 아래 Fig. 1.24는 대우조선해양의 전류고정날개(Pre-Swirl Stator, PSS), 삼성중공업의 세이버 핀(saver fin), 현대중공업의 추력 핀(thrust fin)을 대형 선박에 적용한 모습들이다[16].



PSS

thrust fin

Fig. 1.2 PSS, Saver fin, Thrust fin

위 사례들은 모두 대형 선박에 적용하여 에너지 절감 효율을 입증한 사례들로서, 2013년부터 시작된 EEDI(Energy Efficiency Design Index, 선박 에너지 효율 설계 지수)¹⁾ 규제에 대한 하나의 대응책으로 제시되고 있다. 부가물이나 선형개발에 있어서는 국내 조선 산업이 유럽이나 일본보다 우위에 있음을 입증한 셈이다.

하지만 2015년을 기점으로 매 5년마다 CO₂ 배출량을 10%씩 감축해야 한다. 2015년에는 기준선 대비 10%를, 2020년에는 20%를, 2025년에는 30%를 감축해야 하는 것이다. 중·단기적인 계획으로 어느 정도의 규제는 준수할 수 있는 수준이지만, 장기적으로 봤을 때는 에너지 효율 향상 및 온실가스 배출 절감 기술이 없이는 심화되는 규제를 통과할 방법이 없다. 이는 곧 정상적인 영업이 불가능할 수도 있다는 것이다. 이에 따라 우리 정부는 지난 2011년 저탄소 그린쉽(green ship)²⁾ 기술 개발에 2020년까지 10년 동안 총 3,000억 원을 투입하겠다는 계획을 밝혔다. 세계 조선 산업에 대한 환경 규제에 빠르게 대응하고, 조선 경쟁국인 중국과의 격차를 벌릴 수 있도록 정부 차원에서 적극적으로 나선 것이다. 이제 해외 기술개발 상황을 주시하며 모든 관련 산업이 네트워크를 구축하여 총력적인 기술개발에 뛰어들고, 나아가 미래 조선 산업을 선도하여 조선 강국으로서의 위상을 지켜야 한다.

1.3 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 국내외 정세에 따라 연료전지를 주 추진에너지원으로 사용하는 그린쉽 기술에 대하여 연구한다. 연료전지와 연료전지의 단점을 보완할 수 있는 배터리를 연계한 하이브리드 소형 선박의 추진시스템 및 전력시스템을 설계·제작을 하여 연료전지 선박의 특성을 비교, 분석하였다[17~36].

본 논문은 총 6장으로 구성되어 있으며 각 장의 내용은 다음과 같다.

제 1장에서는 연구 배경에 대하여 설명하고, 연료전지 선박의 국내외 동향에

-
- 1) 선박이 단위무게의 화물을 단위거리만큼 운송할 때 발생하는 CO₂ 배출량을 나타내는 지수. 만약 규제치를 초과할 경우 운항이 금지됨.
 - 2) 화석연료인 석유 대신 연료전지, 태양광, 풍력 등의 신·재생에너지를 동력원으로 사용해 온실가스 배출량을 줄이고 에너지 효율성을 향상시킨 선박.

대하여 기술한다.

제 2장에서는 연료전지선박의 설계 및 시스템 설계에 대하여 기술한다.

제 3장에서는 연료전지시스템의 개념, 연료전지의 특성 및 구성에 대하여 기술하고 연료전지 기반의 하이브리드 추진시스템의 구성과 운용방안 및 연료전지 기반의 하이브리드 전력시스템의 topology에 따른 특성에 대하여 기술한다.

제 4장에서는 연료전지 기반 하이브리드 선박의 전력시스템에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 연료전지선박 통합 시뮬레이션 결과를 분석한다.

제 5장에서는 하이브리드 추진시스템을 갖춘 연료전지선박의 실제 건조, 시운전 운항 및 결과를 분석한다.

제 6장에서는 시뮬레이션과 실제 선박 시운전 운항 데이터를 기준으로 선박용 연료전지시스템의 운영 및 제어 방안을 제안하고, 향후 해결할 과제에 대하여 서술한다.



제 2 장 연료전지 선박

2.1 연료전지 선박 설계

본 논문에서는 연료전지 추진시스템을 장착한 선박을 대상으로 연료전지 전력 시스템을 설계하고 연구하였다. 연구 대상 연료전지 선박에 탑재되는 연료전지 사양은 50[kW] 급이며, 선체 길이는 20[m]급으로 사용 연료는 350[bar]로 압축된 수소를 사용하며, 74[L]용량의 용기를 장착하여 약 4시간 이상 운용가능한 선박이다. 또한 적용 대상 선박은 강 또는 해상 환경에서 운항되며, 유람선이나 요트 형태의 소형선박으로 선정한다. 또한 이렇게 결정된 선박의 기본사양을 기준으로 선박의 기본 제원을 검토하였으며 유사 선박들의 주요 요목들을 분석하여 설계에 반영하였다. 설계의 주요 요목 결정을 위해서 실적선 길이 약 18[m] ~ 21.5[m] 사이의 선박 50척의 주요 요목을 분석하였으며 Fig. 2.1은 50척의 실적선을 분석한 결과이다.

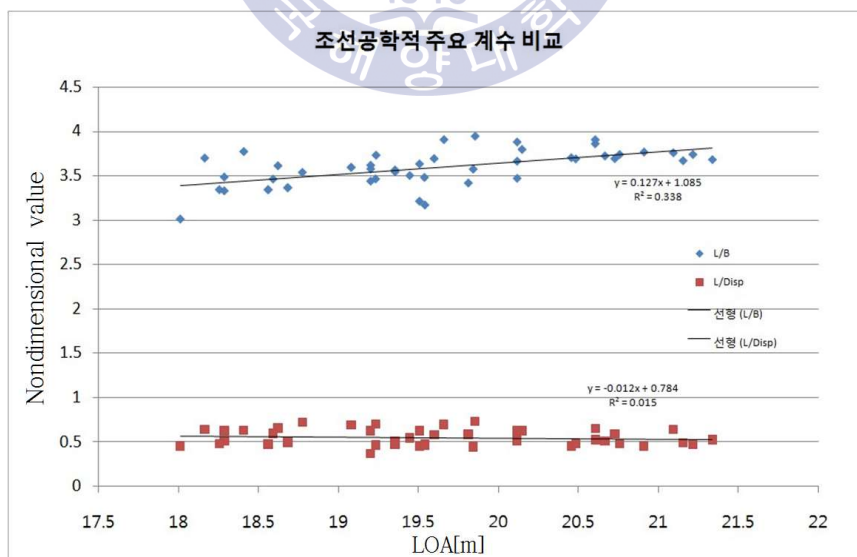


Fig. 2.1 Result of analysis for the performance 50 ships data.

유사 실적선 분석결과 실적선 자료를 기반으로 한 중형(길이/폭)비는 평균 약 3.5정도로 분석 되었으며, 길이/배수량 비는 평균 약 0.6정도 수준임을 확인할 수 있었다. 또한 결정된 동력원을 기준으로 하여 개념설계 시 참조할 선박은 개발 목표와 유사한 시스템을 사용하는 독일의 Zemship으로 이 모델을 model ship으로 결정하여 개발을 진행하였고 Fig. 2.2는 model ship의 모습과 내부 구조를 보여주고 있다.

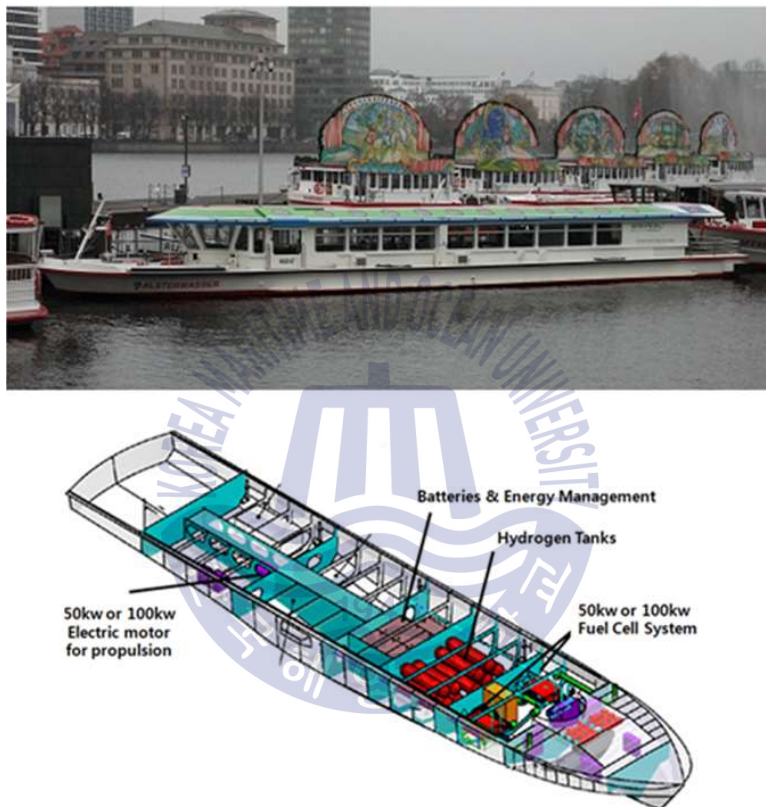


Fig. 2.2 Figure and inner view of model ship

독일 Zemship을 참고하여 장비 종류, 배치 등 기본설계를 수행하였다. 탑재 주요 시스템으로는 model ship과 유사한 전기추진방식으로 25[kW]급 연료전지 2개를 탑재하고 300~350[bar]의 수소 518[L]를 장착하고 전기 저장을 위한 24[V] 200[A]용량의 배터리를 장착하는 것으로 설계하였다. 표 2.1은 적용대상 선박의 제원이다.

Table 2.1 Ship specifications

Classification	Specification
Carrying capacity [person]	50
L.O.A [m]	20
Breadth [m]	5
Height over waterline [m]	3 ~ 3.3
Full load displacement [ton]	30 ~ 32
Max Cruising speed [km/h]	15 (abt. 8 [knot])
Hull Material	Aluminum
Propulsion system	Water Jet
Fuel cell power [kW]	50

2.2 연료전지 선박 시스템 배치

기본적인 구조 부재 치수 결정 후 3D설계 틀을 이용하여 상세 설계 및 일반 배치를 진행하였다. 탑재 장비의 치수는 최종 검토된 치수를 기준으로 배치 작업을 수행하였다. 각 장비와 시스템의 배치는 유지보수 측면을 고려하여 배치 연구를 수행하였다. 각 시스템의 배치는 선박의 트림상태를 변화시키는 요인이 되며, 안전을 고려하여 여객 공간과 시스템 공간이 분리되도록 배치를 하였다. 본 연료전지 선박은 여객선 용도로 설계 하였으므로 연료전지 시스템과 여객 공간의 분리를 위해 해양수산부가 정하는 여객기준에 부합하도록 여객 공간을 확보할 필요성이 있었다.

해양수산부에서 정하는 정원 산정 기준은 크게 면적으로 할당하는 방법과 의자 수로 산정하는 방법이 있으며, 의자의 경우 운항 시간에 따른 추가적인 기준이 있어 2가지 방법을 모두 만족시키도록 여객 공간을 확보하였으며, 여객정원 산정법을 정리하면 다음과 같다.

- 여객의 정원은 객석에 수용할 수 있는 여객수로 한다.
- 3시간미만의 연해 및 평수구역은 침대, 좌석, 의자 또는 입석 장소로 배치

하여도 무방하다.

- 여객실 객석의 의자는 안쪽길이가 40[cm]이상, 등받이와 팔 받침으로 구성된 것이어야 한다.
- 의자 전면에는 거리 30[cm]이상 공간을 두며, 선박의 거동에 이동 되지 않도록 고정하여야 하며, 호수 하천 운항 시에는 제외 될 수 있다.
- 의자의 등판 높이 및 팔 받침너비 기준은 6시간 미만의 선박의 경우 등받이 높이는 55[cm]이상 팔 받침은 5[cm]이상이 되도록 하여야 한다.

면적으로 산정된 기준은 이동시간이 1시간 30분 이내의 경우는 1인당 0.3[m³]의 면적이 요구되며, 50명의 여객 공간은 15[m³]이 필요하다. 또한 의자를 설치할 경우 앞서 기준에서 제시한 기준을 만족하도록 의자 배치를 고려하고 추가적으로 통로 공간을 확보하여 최종 37.96[m³]의 면적을 여객 공간으로 확보하였다. Fig. 2.3은 여객선 설비 기준에 의한 의자 및 설계에 반영될 여객 공간 계산을 보여주고 있다.

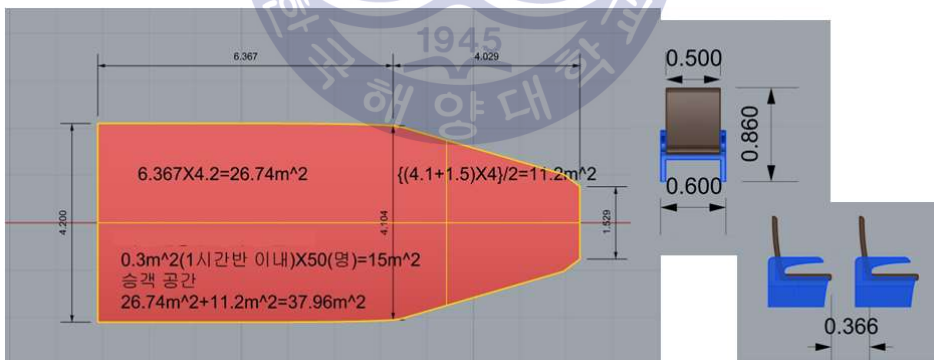


Fig. 2.3 Calculation of passenger space

Fig. 2.3의 결과를 반영하여 최종 여객 공간 배치를 수행하여 탑승정원 50명의 정원이 만족되는 선실 공간을 확보하였으며, Fig. 2.4는 좌석이 배치된 모습을 보여주고 있다.

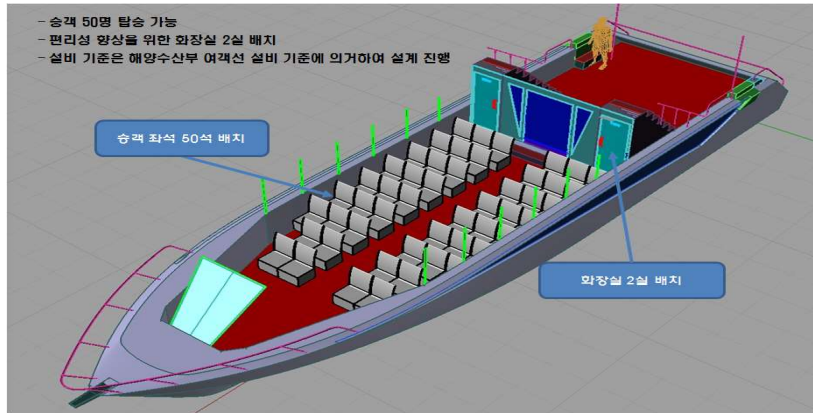


Fig. 2.4 Layout of passenger space

여객 공간과 연료전지 시스템의 설치 구역을 분리시키기 위해 확보된 여객 공간을 제외한 선미 부에 연료전지 시스템 각각의 구성을 유사 크기로 단순화 하여 3D기반으로 배치하여 입체화 하였다. 연료전지 시스템의 구성은 전력을 생산하는 시스템 모듈(stack) 2기와, 스택의 구동과 관련된 파워 모듈 2기, 생산된 전력을 변환시키는 컨버터 모듈 2기, 부족한 동력을 보충해줄 리튬배터리 3기, 배터리를 충전해주는 충전기 모듈, 이 모든 구성의 정보를 모니터링하는 통신 모듈, 동절기 동파 방지를 위한 전기 히터 2기, 전력을 생산하면서 발생하는 물과 수소 벤트 모듈 각각 2기, 수소를 저장하는 수소용기, 연료전지 시스템의 냉각을 담당하는 냉각시스템으로 구성되어 있다. 주요 시스템 배치는 크게 3개의 구역으로 분리하였다. 우선 가장 위험성이 높은 고압 수소를 보관하는 수소 저장 공간을 외부와 단절시키기 위해 전용 공간에 배치하기로 하였으며, 연료전지시스템(스택, 통신연계기, 통신모듈, 배터리 충전모듈, 파워 모듈, 컨버터 모듈, 벤트 모듈)은 같은 장소에 배치하고, 스파크 발생 등으로 폭발 점원이 될 가능성이 있는 배터리는 분리하여 워터젯룸(water-jet room)에 배치하였다. 수소용기와 연료전지시스템은 각각 독립된 구역으로 배치하였으며, 분리된 각 공간은 각각의 공간 체적의 30배를 환기할 수 있는 용량의 팬이 설치되도록 시스템 배치를 수행하였다.

Fig. 2.5는 각 장비 및 시스템의 배치를 보여주고 있다.

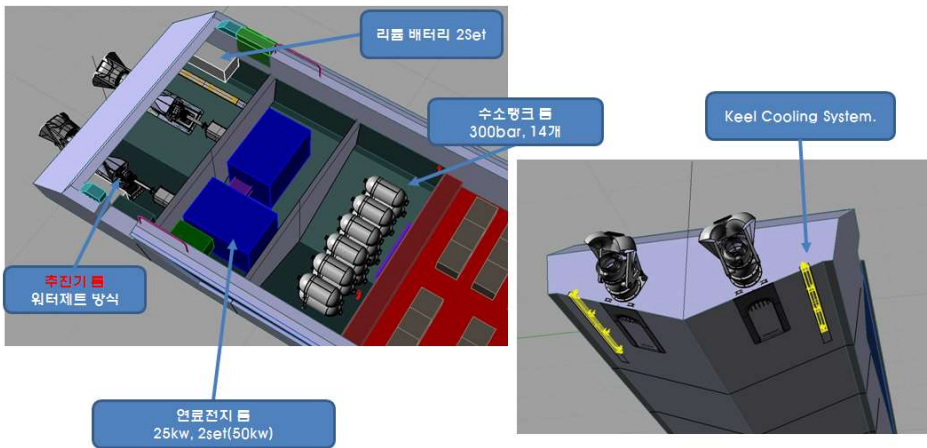


Fig. 2.5 Arrangement of the system

폭발 위험성이 존재하는 연료전지 룸의 배치는 룸 벤트(room vent) 해석을 통해 최종 결정하였다. 워터젯 룸의 배치는 워터젯과 모터, 추진축, 킬(keel) 냉각장치, 인버터, 보조 동력용 배터리가 설치되며, Fig. 2.6에 구조부재가 배치된 상태로 최종 배치가 완료된 모습을 보여주고 있다.

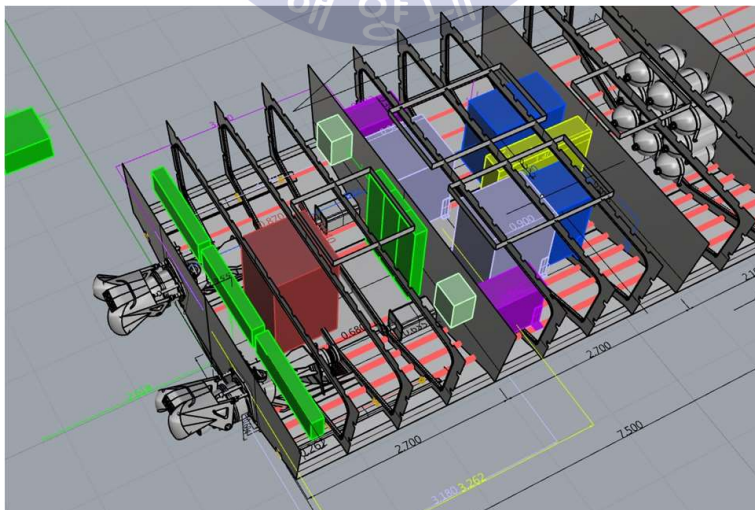


Fig. 2.6 Arrangement of the all system

2.3 연료전지 룸 환기 시스템

가) 수소연료전지 시스템에 대한 환기 시스템 연구

연료전지선박의 수소연료전지 시스템 사용에 따른 위험을 줄이기 위해 스택 룸과 수소탱크 룸의 환기 시스템에 대한 연구는 필수적이다. 대형 LNG선에서는 가스연료(gas-fuelled)를 추진기관의 연료로 사용하고 있으며 Res.MSC.285(86)의 환기요건에는 “펌프 및 압축기실에는 부압형식의 적절한 기계식 통풍장치가 제공되어야 하며 시간당 최소 30회 이상의 환기능력을 가지는 것이어야 한다.”, “주배전반 혹은 비상배전반으로부터 분리된 회로를 갖는 팬 혹은 주배전반 혹은 비상배전반과 공통의 배전반을 갖는 팬 그룹이 작동되지 않을 경우, 환기팬의 개수 및 전력은 전체 환기 능력의 50% 이상 손실되지 않는 것이어야 한다.”로 규정되어 있다. 연료전지 선박은 가스연료 선박과 시스템의 구성 및 사용하는 가스에서 차이점을 가지므로, 본 연구에서 연료전지 선박에 맞도록 사용하는 수소가스 특성 및 관련 규정을 기준으로 환기시스템을 연구하였다.

나) 수소가스의 물리적 특성

수소연료전지시스템에서 사용되는 수소가스의 물리적 특징은 다음과 같다.

- 수소가스는 비독성 가스이지만 공기 중에서 산소대신 공간을 차지할 때 질식가스로 작용하며 무색, 무취, 무미이기 때문에 산소대신 수소로 이루어진 공기를 흡입하여 무의식상태가 아무런 경고나 물리적 징후 없이 발생할 수 있다.
- 발화위험은 질식을 일으키는 농도보다 더 낮은 상태에서 일어난다.
- 대기압에서 발화한계는 약4~75%[VOL.]이다. 수소-공기의 혼합물은 점화하기가 극히 쉬우며, 혼합물의 점화에너지는 0.02[mJ]로 이는 스파크가 발생하는 정전기방전의 에너지와 비슷하다(일반적인 내연기관의 탄화수소계 연료는 0.25[mJ]임).
- 건조상태에서 인간의 몸에서 발생하는 정전기는 수소를 점화하기에 충분하며, 이러한 이유로 정전기가 발생하지 않는 선박 내부의 환기시스템은 수소와

관련된 안전기준을 가져야한다.

- 수소는 원자 크기가 작기 때문에 다공성 물질을 통해 빠르게 확산된다.
- 대기온도에서 금속에 느리게 확산 및 용해되며, 높은 온도에서는 보다 빠르기 때문에 동일한 압력에서 다른 일반 가스나 공기를 위해 가스나 적정하게 주입된 시스템으로부터 누설이 발생할 수 있고, 여러 가닥의 도선의 내부 통로를 통하여 수소의 누설이 가능하다.
- 수소의 비중은 0.0696으로 모든 가스 중 비중이 가장 낮으며 공기의 1/16 수준으로 아주 높은 확산율을 가지고 있다.
- 수소는 메탄 보다는 4배, 가솔린 증기보다는 10배의 확산속도를 가지고 있음. 액체수소 또한 무색, 무취, 비부식성이나 액체수소가 따뜻해짐에 따라 가스로 증발하여 수소가스의 특성을 가지게 된다.

다) 국내 수소연료전지 선박의 환기 시스템 규정

선박에 연료전지시스템을 적용할 경우 “선박용 연료전지 시스템 지침(안)”에 대해 한국선급에서 검토하고 있으며 세부내용을 추가하고 있다. 일반적인 연료전지시스템을 적용한 선박의 통풍장치에 대한 사항을 준용하면 다음과 같다.

- 일반사항 : 공기보다 무거운 가스 및 증기(프로판, 부탄 등)를 연료전지용 연료로 사용하는 관 장치로부터의 방출원을 포함하는 구역의 통풍장치

- (1) 해당 구역은 기계식 배기 통풍기에 의하여 통풍되어야 한다.
- (2) 공급 공기는 구역의 상부로 연결되어야 한다.
- (3) 배기 공기 덕트는 가능한 구역의 바닥에 가깝게 설치하여야 한다.
- (4) 통풍 흡입구는 그 구역의 가장 낮은 곳에 위치하여야 한다.

- 공기보다 가벼운 가스를 연료전지용 연료로 사용하는 관장치로부터의 방출원을 포함하는 구역의 통풍장치

- (1) 해당 구역은 기계식 배기 통풍기에 의하여 통풍되어야 한다.

(2) 공급 공기는 구역의 하부로 연결되어야 한다.

(3) 통풍 흡입구는 그 구역의 상부에 위치하여야 한다.

(4) 플랜지, 밸브 등을 포함하는 구역에는 공기/가스 혼합물을 배출될 수 있도록 흡입 후드 또는 흡입 트렁크 상부에 설치하여야 한다.

- 가스 탱크실

(1) 갑판의 하부에 위치한 가스 저장 탱크를 위한 탱크실은 시간 당 적어도 30회의 환기 용량을 제공하는 부압식의 효과적인 기계식 통풍장치로 제공되어야 한다. 다른 적절한 방폭의 수단이 설치된 경우에는 환기 횟수를 낮출 수 있다. 대체수단의 동등성에 대해서는 위험분석에 의해 증명되어야 한다.

(2) 수소 탱크를 위한 탱크실은 적절한 환기 비율 및 배치를 가져야 한다.

(3) 승인된 자동 페일-세이프(fail safe)형 화재 댐퍼가 탱크실의 통풍 덕트에 설치되어야 한다.

연료전지 시스템은 공기와 수소를 연료로 사용하므로, 위의 내용 중 공기보다 가벼운 가스를 사용하는 구역의 통풍장치 일반사항을 적용하였으며, 갑판 하부에 수소저장을 위한 별도의 저장 탱크가 있으므로 연료전지 스택 룸과 수소탱크 실에 대해 시간 당 30회 이상의 환기 용량을 제공할 수 있도록 시스템을 설계하였다.

라) 수소연료전지 스택 룸 내부 유동해석

연료전지시스템이 탑재되어 있는 내부 공간에서 수소가스 누출 시의 상황을 모사하기 위해, 먼저 강제 외부 환기 시의 핵심 부품 주위 및 룸 내의 유동분포 특성을 확인하였다. 연료전지 스택 룸의 환기 용량은 스택 룸의 용적을 기준으로 계산하였으며, 스택 룸의 내부 형상 크기는 Fig. 2.7과 같고, 용적은 약 $11.3[m^3/h]$ 이다. 스택 룸의 환기 용량은 시간당 스택 룸 용적의 30배 이상을 제공해야 하므로, 용적 $11.3[m^3/h]$ 의 30배인 약 $340[m^3/h]$ 로 설정하였으며, Fig. 2.7은 연료전지 룸의 내부 용적 및 설비가 장착된 공간을 보여주고 있다.

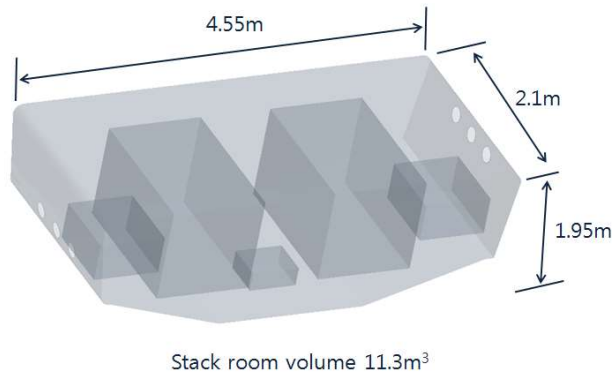


Fig. 2.7 Volume of fuel-cell stack room

수소가스가 누출되지 않는 상태에서 강제 외부 환기 시 스택 룸 내부의 유동 분포를 확인하기 위해 내부 유동해석을 수행하였다. 수소가스 누출을 고려하면 룸 내의 주요 위치에서 수소농도가 중요한 사항이며, 수소가스의 농도는 수소가스의 분출 위치, 수소가스의 분출 시간, 외부 환기 시스템의 입구와 출구부의 위치 등에 따라 차이가 있게 된다. 따라서 수소가스의 누출 조건을 고려하기 이전에 외부 환기시스템에 설치 시의 룸 내 내부 유동을 먼저 파악하고 분석하고자 한다. 본 연구에서는 스택 룸 내부의 유동을 분석하기 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics)에서 범용적으로 사용되는 해석 프로그램인 플루언트(fluent)를 이용하여 유동장 해석을 수행하였다. CFD는 실제 모사가 어려운 다양한 현상들을 모사하여 유동을 추정하고 분석이 가능한 장점이 있어 매우 범용적으로 사용되고 있다. 또한 플루언트는 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 이용하여 복잡한 형상의 열전달 문제와 유체유동문제를 해석하는 범용코드로 플루언트에서는 이차원 삼각, 사각격자와 삼차원 사면체, 육면체, 피라미드형, 썰기형 그리고 복잡형 격자를 지원하여 복잡하고 다양한 형상을 모델링 할 수 있다. 이와 함께 압축성, 비압축성문제, 정상 상태 또는 비정상 상태, 비점성, 층류, 난류 유동, newtonian 유동, non-newtonian 유동, 복사열 전달, 전도와 대류의 복합적 열전달 문제, 공동현상(cavitation) 등 유체역학 전반에 걸친 문제를 해석할 수 있다는 장점도 있다. Fig. 2.8에는 CFD를 이용한 내부 유동해석 방법을 도식화 하여 보여주고 있다.

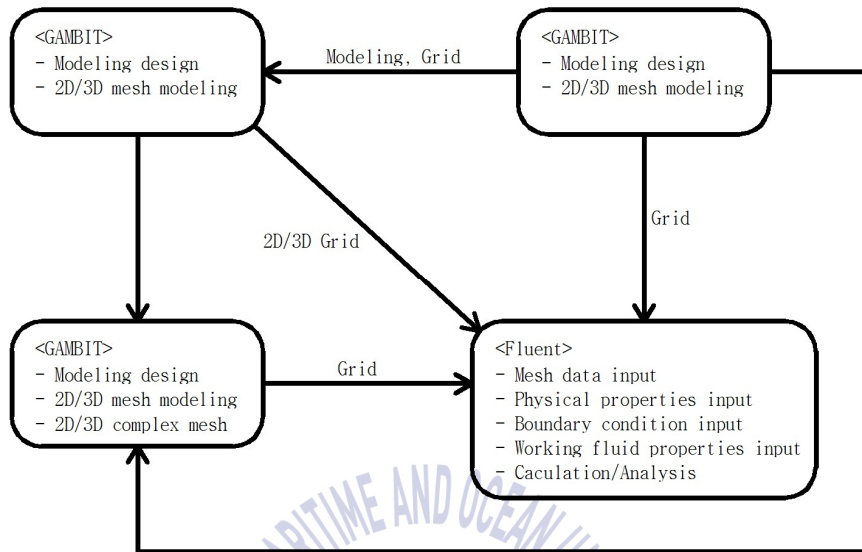


Fig. 2.8 Flow analysis illustrates how using CFD

선체 내부 유동을 3차원 정상상태(steady), 비압축성(incompressible), 점성 유동(viscous flow)으로 가정하여, 상용 RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) solver인 fluent를 이용하여 성능추정에 필요한 유동정보를 획득하였다. 선체 표면 및 외부 유체의 압력 및 속도분포를 산출하기 위해서 사용된 지배방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식이며, 난류모델은 이미 산업계에서 타당성을 검증 받은 모델을 사용하였다[37].

(1) 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

(2) x방향 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho UV)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho UW)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial U}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + S^U \end{aligned} \quad (2-2)$$

(3) y방향 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho UV)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho VW)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial V}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + S^V \end{aligned} \quad (2-3)$$

(4) z방향 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho UW)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VW)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W^2)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial W}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial W}{\partial y} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{eff} \frac{\partial W}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + S^W \end{aligned} \quad (2-4)$$

(5) 난류운동에너지 k 방정식

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon - Y_M \quad (2-5)$$

(6) 난류운동에너지 소산률 ϵ 방정식

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \quad (2-6)$$

상기 식에서, C_1 은 아래 식과 같이 표현된다.

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = Sk/\epsilon \quad (2-7)$$

G_k 는 평균 속도 구배에 의한 난류 운동에너지의 발생, G_b 는 부력에 의한 난류 운동 에너지의 발생을 의미하며, C_ϵ , C_2 는 상수, σ_k , σ_ϵ 은 난류 Prandtl수이다. 난류 운동 에너지의 생성항인 G_k 는 k 의 transport에 대한 완전방정식으로부터 아래 식과 같이 정의된다.

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2-8)$$

Boussinesq 이론에 일치하도록 G_k 를 산출하기 위해서는 아래 식과 같이 표현된다.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2-9)$$

여기서 S 는 아래 식에서 정의하는 바와 같이 평균 변형률 계수이며, 평균 변형률 S_{ij} 는 다음 식으로 주어진다.

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2-10)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2-11)$$

G_b 는 부력의 의한 k 의 생성함으로 중력장이 존재하고 온도구배가 동시에 있

을 경우에 해당하는 것으로, ϵ 의 발생에 상당한 기여를 하며 아래 식과 같이 표현되며, Pr_t 는 난류 Prandtl수이다.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2-12)$$

와류 혹은 난류 점성도인 μ_t 는 k 와 ϵ 의 조합으로 다음과 같은 수식으로 표현되며, C_u 는 상수이다.

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2-13)$$

Fig. 2.9는 해석을 수행한 연료전지 스택 룸의 형상이다. 현재 설계된 스택 룸의 주요구성 요소인 2개의 연료전지 스택, 2개의 파워 모듈, 통신연계기를 룸 내부에 배치하였다. 아래 Fig.2.9와 같이 스택 룸에서 스택의 부피가 가장 크며, 룸 체적 대비 차지하는 부피가 커서 내부의 유동흐름에 방해 요소로 판단된다.

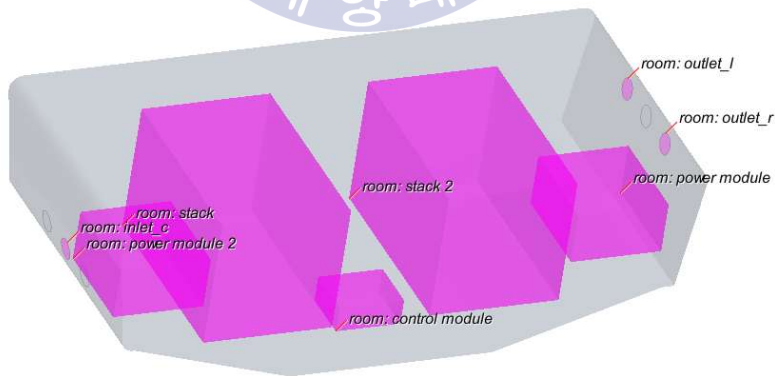


Fig. 2.9 Stack room analysis model

연료전지 스택 룸 내부유동 해석에 사용된 경계조건은 내부유동 해석 시 입구부에 유량조건을 적용한 해석조건과 룸 내부 유동의 유속증가 및 균일성 향상을 위해 입구부에 대기조건, 출구부에 유량조건을 적용하여 해석을 수행하였으며, 시간당 룸 용적의 30배로 배출되는 강제 환기 조건은 동일하게 하고 배출되는 유량의 위치변화에 따른 내부 유동흐름을 분석하였다. 또한 연료전지시스템에서 수소가스가 누출되지 않도록 근본적인 설계가 되어야 하나 예상치 못한 상황에 의해 수소가 세어 나오는 상황에 배출조건하에 얼마나 잘 배출 되는지 해석을 통해 알아보고자 하였다. Fig. 2.10은 stack room 유동해석 경계조건이며, Fig. 2.11은 stack room에서 수소 누설 발생 시 유동해석 경계조건이다.

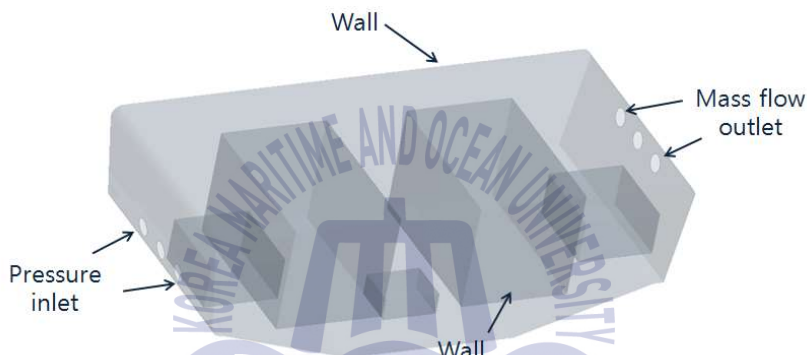


Fig. 2.10 Flow boundary conditions in stack room

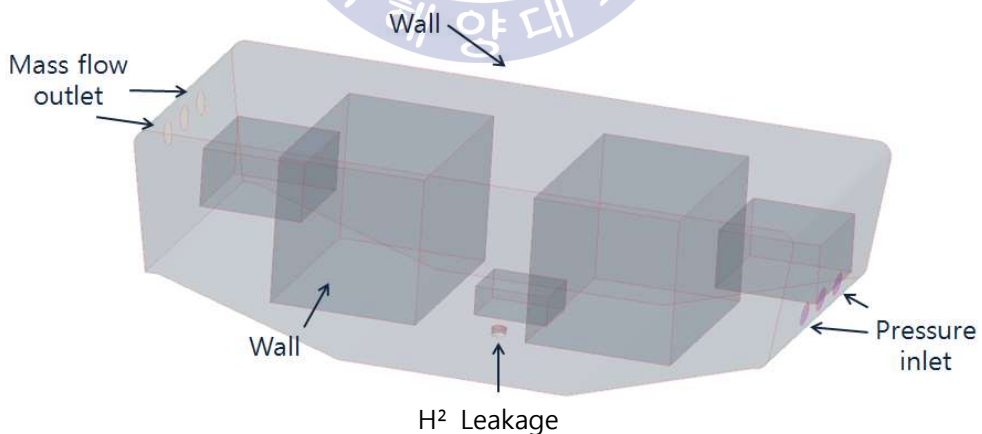


Fig. 2.11 Boundary conditions for stack room leakage

Fig. 2.12는 내부 유동해석을 위해 사용된 격자이다. 룸 내부의 전체형상과 스택 및 파워 모듈 등의 형상을 고려하여 비정렬 격자를 사용하였으며, 다면체 격자를 이용하여 해석영역의 격자를 생성하였다. 해석에 사용된 격자수는 약 55만개이다.

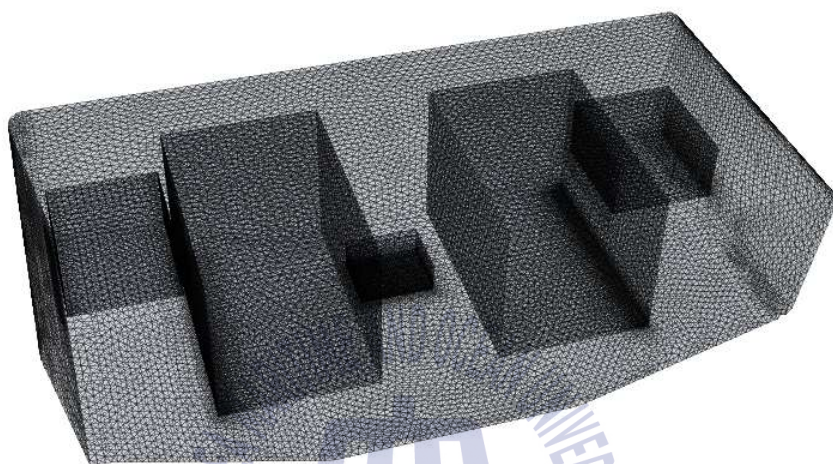


Fig. 2.12 Interpretation area volume mesh

마) 수소연료전지 스택 룸 내부 유동해석 결과

연료전지 스택 룸 내부에 강제 환기 시스템을 적용할 때 내부 공기의 유선흐름 분포는 Fig. 2.13, Fig. 2.14와 같다. 전체 룸 크기 대비 스택의 크기가 크므로 유입된 공기는 스택 외부 면을 타고 흐른 뒤에 출구부로 배출되는 것을 볼 수 있다. 입구부 앞에 있는 스택이 장애물로 작용하여 내부 유동의 유속 감소가 큰 것으로 보이며, 출구에 강제 배기조건을 적용한 경우와 입구에 강제 배기조건을 적용한 결과는 룸내의 스택 및 파워 모듈이 선체 중심을 기준으로 대칭적으로 배치되어 있고 룸 체적대비 여유 공간이 크지 않아 변화가 크지 않는 것으로 판단된다.

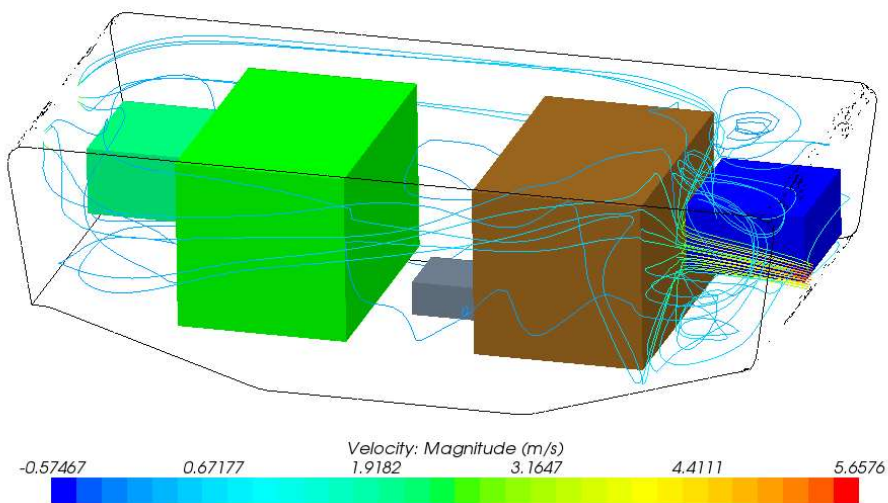


Fig. 2.13 flowing lines in stack room of outlet forced discharge ventilation condition

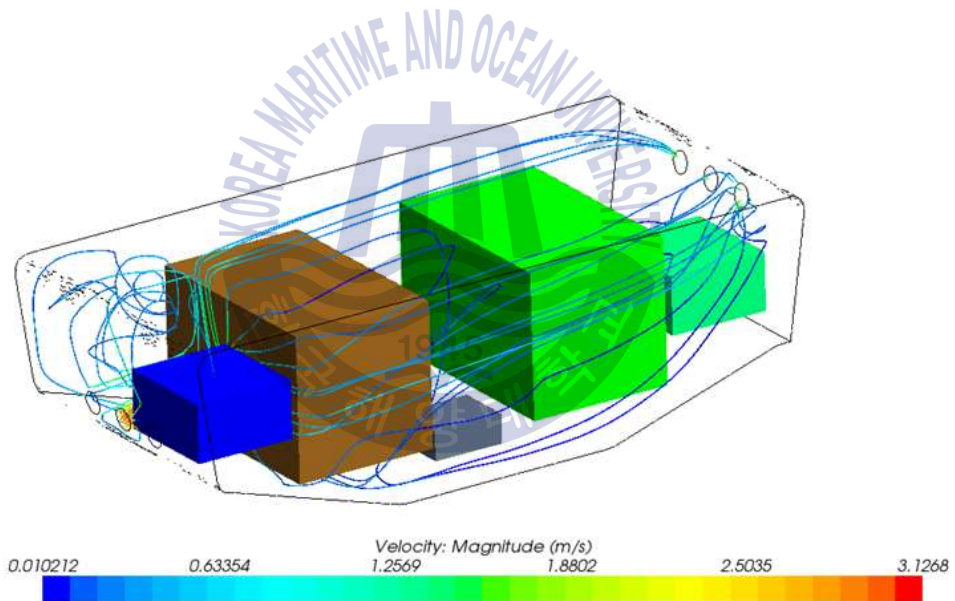


Fig. 2.14 flowing lines in stack room of inlet forced discharge ventilation condition

Fig. 2.15와 Fig. 2.16은 스택 룸 내부의 수직 단면 속도 분포를 나타낸 것이다. 수직면의 전체적인 속도 분포를 보면 두 케이스 모두 입구부 왼쪽 하부에서 출구부 오른쪽 상부로 유동의 속도분포가 형성되는 것을 볼 수 있다. 실제 수소가스가 내부에서 누출되더라도 출구부를 통해 배출되어야 하므로, 이와 같

은 유동흐름은 타당한 것으로 판단된다. 수직 단면 속도 분포 아래에는 각각의 x축 방향 단면에서의 속도 분포를 나타내었다. 입구부에 유량조건을 부여한 경우는 경계조건의 특성 상 입구부 주변의 유속이 출구부 주변보다 빠른 것을 볼 수 있으며, 출구부에 유량 출구조건의 해석의 경우 입구부 유량조건보다 전체적으로 개선됨을 확인할 수 있다.

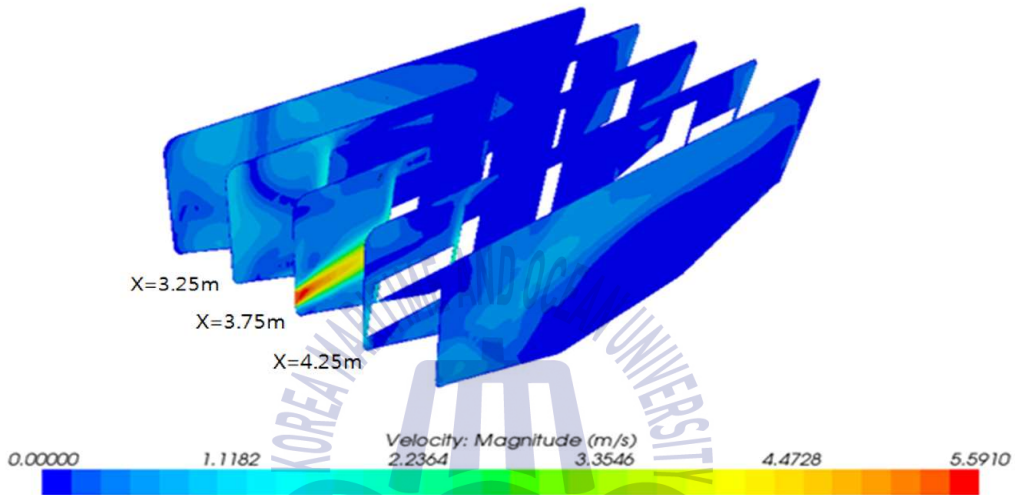


Fig 2.15 Vertical velocity distribution in stack room of outlet forced discharge ventilation condition



Fig 2.16 Vertical velocity distribution in stack room of inlet forced discharge ventilation condition

수소가스 누출 가정 시의 룸 내부 유동해석 환기조건은 입구에서 외부공기가 유입되고, 출구에서 약 340[m³/h]로 강제 배기되도록 설정하였으며, 수소가스는 룸 하부 중앙에서 누출되고, 내부 유동은 정상상태의 비압축성 다중성분 유동으로 가정하였고, 구성기체는 상온에서의 수소와 공기이며, 기체들 사이의 화학반응은 고려하지 않았다.

유동해석결과는 Fig. 2.17과 같이 분출된 수소는 공기와의 비중 차에 의한 확산과 강제배기에 의한 유동흐름을 나타냈으며, 분출 위치 상부로 상승 후 배기출구를 통해 잘 배출되는 것을 볼 수 있었다. 분출 위치 부근에서는 수소의 농도가 높으나 상부로 갈수록 확산되고 상부 부근에서는 인화 가능한 비율보다 낮은 농도로 배출되는 것으로 나타남을 확인하였다.

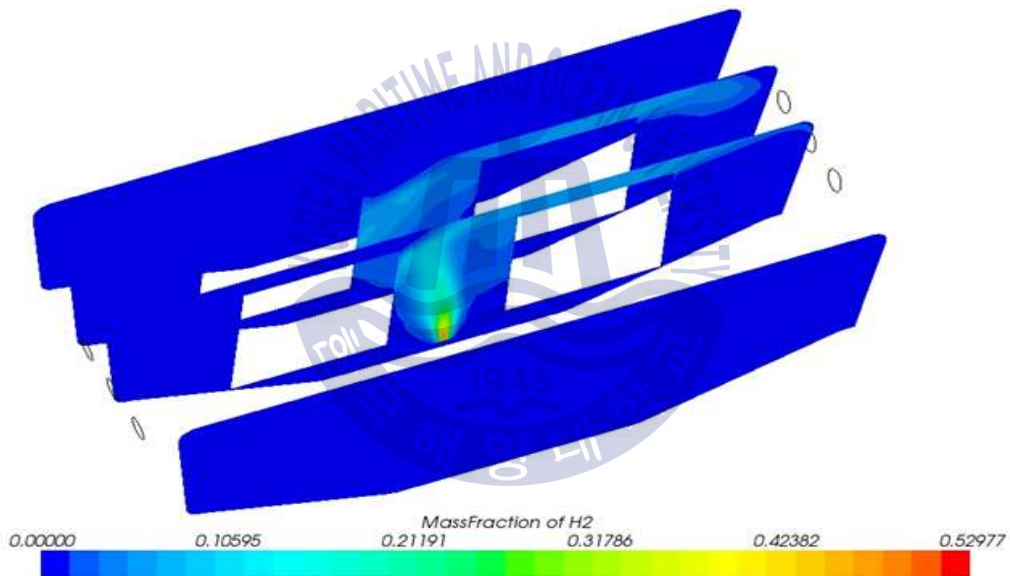


Fig. 2.17 Vertical velocity distribution of stack room H² leaked

제 3 장 연료전지 시스템

3.1 선박용 연료전지 시스템

3.1.1 연료전지 개념과 종류

연료전지는 연료와 산소를 전기·화학적으로 반응시켜 전기에너지를 발생하는 장치로서 화학 반응은 촉매를 통해 이루어지고, 연료가 지속적으로 공급된다면 계속해서 발전이 가능하다. 연료전지는 일종의 전지(battery)이지만 전기 저장 이 아닌 저장하고 있는 연료를 소모하면서 전기를 생산하게 된다. 일반적인 전 지는 반응을 하게 되면 충·방전 상태에 따라 전극이 바뀌지만 연료전지의 전극 은 촉매작용을 하기 때문에 상대적으로 안정적이다.

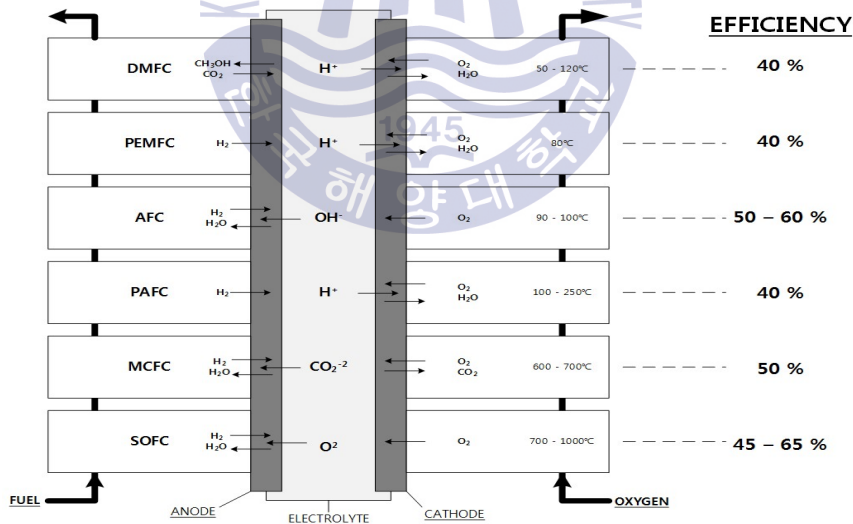
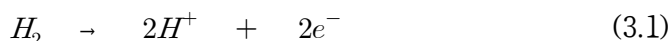


Fig. 3.1 Principle of fuel cell

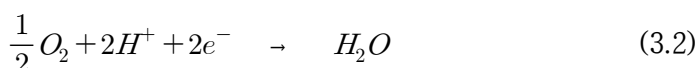
Fig. 3.1을 보면 대부분의 연료전지가 수소(연료극, anode)와 산소(공기극, cathode)의 화학반응에 의하여 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시킨다는

것을 알 수 있다. 이는 대부분의 연료전지가 가지고 있는 발전 방식이고, 원리상 열기관이 갖는 열역학적 제한인 카르노 효율의 영향을 받지 않는다. 또한 Fig. 3.1에서 알 수 있듯이 화학반응의 결과물로서는 전기, 순수한 물, 그리고 열을 배출하게 된다. 연료전지의 전기화학 반응은 막 양쪽의 애노드와 캐소드에서 동시에 일어나며, 이를 화학식으로 나타내면 다음과 같다.

애노드 반응



캐소드 반응



총 반응



연료전지 화학반응을 보면 순수한 물과 열 그리고 전기에너지가 발생된다. 수소연료 반응의 엔탈피는 수소의 발열량으로서, 수소 1몰과 산소 ½몰을 넣고 연소시킨 다음 측정할 수 있다. 화학 반응으로 발생한 열은 연료전지의 성능에 영향을 미치기 때문에 연료전지의 종류에 따라 적절한 온도를 유지시키기 위해 냉각시스템을 적용하여 반응열을 이용한 복합발전도 기대할 수 있다.

연료전지의 종류는 연료전지를 구성하는 전해질의 종류에 따라 다음과 같이 분류되는데, DMFC(Direct Methanol FC), AFC(Alkaline FC), PAFC(Phosphoric Acid FC), MCFC(Molten Carbonate FC), SOFC(Solid Oxide FC), PEMFC(Polymer Electrolyte Membrane FC)가 있으며 지금까지 차례대로 발전되어 왔다.

PAFC(인산형 연료전지, Phosphoric Acid Fuel Cell)은 연료전지 1세대로서 인산을 전해질로 사용하며 전극촉매는 모두 백금이다. 작동온도는 100~250[°C] 정도이며 발전용으로 이미 상용화되어 설치되고 있는 추세이다.

다음은 많이 사용되어지고 있는 연료전지 종류에 따른 특징을 나타낸다.

MCFC(용융탄산염형 연료전지, Molten Carbonate Fuel Cell)는 알칼리 탄산염

의 조합으로 구성된 전해질을 사용하며, 작동온도는 600~700[°C] 정도이고 전극 촉매는 니켈을 사용한다. 발전용, 산업용, 군수용으로 널리 보급되어 있는 상태이다. 고온에서 작동하므로 외부 개질기(reformer)가 필요 없다는 장점이 있다.

SOFC(고체 산화물형 연료전지, Solid Oxide Fuel Cell)는 전해질로서 고체의 비다공질 금속 산화물인 지르코니아를 주로 사용한다. 작동온도는 산소 이온에 의한 이온 전도가 일어나는 700~1000[°C]이다. 상대적으로 단순한 구조를 가지고 있고, 다양한 연료를 사용할 수 있으며, 직접적으로 탄화수소를 사용할 수 있기 때문에 MCFC와 마찬가지로 발전용으로 많이 사용된다.

PEMFC(고분자 전해질형 연료전지, Polymer Electrolyte Membrane/Proton Exchange Membrane Fuel Cell)는 얇은 양이온 전도성 고분자막을 전해질로 사용하고, 촉매는 탄소를 담체로 사용한 백금이다. 작동온도는 60~80[°C] 정도이며 초기 운전 필요시간이 짧다. 또한 낮은 작동온도와 높은 전력 밀도, 중량 및 체적이 작아 비교적 우수한 휴대성을 가지고 있어 소형 분산발전, 수송, 에너지 저장시스템 등에 많이 적용되는 형태의 연료전지이다. Table 3.1은 작동온도 및 전해질의 화학적 성질에 따라 연료전지를 분류해 놓은 것이다.

Table 3.1 Types and features of fuel cell

Type	AFC	DMFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Operating Temperature	65~250[°C]	60~120[°C]	60~80[°C]	150~220[°C]	600~700[°C]	800~1000[°C]
Electrode	Transition Metal	Carbon	Carbon	Carbon	Nickel and Nickel oxide	Perovskite metal cermet
Catalyst	Platinum	Platinum Palladium	Platinum	Platinum	Electrode material	Electrode material
Electrolyte	Mobilized or Immobilized Potassium hydroxide in matrix	Hydrated polymeric ion exchange membrane	Hydrated polymeric ion exchange membrane	Immobilized liquid phosphoric acid in SiC	Immobilized liquid molten carbonate in LiAlO ₂	Perovskite (ceramic)
Charge Carrier	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Realised Power	Small plants 5~150[kW] modular	Small plants 5[kW]	Small plants 5~250[kW]	Small-medium sized plants 50[kW]~11[MW]	Small power plants 100[kW]~2[MW]	Small power plants 100~250[kW]
Application	Space Military	Transportation Space and military Energy storage system		Combined heat & power for stationary system	Combined heat & power for stationary and for transportation	

3.1.2 연료전지의 구성

연료전지 시스템은 연료 산화제에 따라서 수소-산소 시스템, 수소-공기 시스템, 개질가스-공기 시스템으로 구분할 수 있다. 그 중 수소-산소 시스템의 경우 잠수함이나 우주선과 같이 공기를 구할 수 없는 특수한 경우에 주로 사용되며, 일반적으로 대부분의 시스템에서는 송풍기나 압축기를 이용하여 공기를 공급하는 수소-공기 시스템을 채택하고 있다. 하지만 이 시스템의 경우 산소의 4배나 되는 질소를 연료전지에 통과시켜야하기 때문에 출력 전력과 효율에 손해가 발생하게 된다.

연료전지의 구성 시스템 중에서 개질기는 화석연료(천연가스, 메탄올, 석유 등)로부터 단위전지를 수십 장 내지는 수백 장씩 직렬로 쌓아 올린 본체이다. 스택(stack)은 전기를 발생시키는 장치이며, 전력변환기(inverter)는 요구되는 전기적 출력을 얻기 위해 연료전지에서 나오는 직류 전류를 교류 전류로 변환시키는 장치이다.

주변보조기기(BOP: Balance of Plant)에는 연료, 공기, 열 등을 회수하기 위한 펌프, 블로워, 센서 등이 있다. 연료전지는 기본적으로 다수의 단위 셀(cell)을 쌓아 하나의 스택으로 만든 것으로, 한 셀의 캐소드(cathode)는 인접 셀의 애노드(anode)와 전기적으로 연결된다. 하지만 연료전지는 이러한 스택만으로는 발전하지 못하며 주변의 보조기기가 반드시 필요하다. 전형적인 연료전지 시스템은 이러한 역할을 해주는 장비로서 BOP(Balance of Plant) 시스템을 갖추고 있으며, 그 기능은 산화제(산소 또는 공기) 공급, 연료(수소) 공급, 열 관리, 물 관리 등이다.

먼저 산화제 공급 장치에 관하여는 송풍기를 구동하여 산화제를 공급하고 대기 중으로 직접 방출하는 ‘상압 시스템’과 그리고 압축기를 구동하여 압력조절기를 통해 설정 압력을 유지하는 ‘가압 시스템’으로 분류할 수 있다. 아래에 보이는 Fig. 3.2(a)는 상압 시스템, Fig. 3.2(b)는 가압 시스템이다. 연료전지를 고압에서 운전하는 기본적인 이유는 출력을 높이기 위함이다. 그러나 압축동력 소비를 고려한다면 반드시 고압 운전일 때 더 높은 출력을 얻을 수 있는 것은 아니다. 또한 목표 공기 유량은 압축속도로 조절하는데, 저압 시스템에서

는 압축동력 소비가 많지 않기 때문에 일정한 유량으로 산화제를 공급해주는 편이 유리하다. 고압 운전 시스템에서는 압축기의 상태가 부분 부하일 경우, 일정 유량 운전은 시스템 효율에 나쁜 영향을 준다. 그래서 가압 시스템에서는 발생 전류에 비례하여 공기 유량을 조절해주는 것이 아주 중요하다.

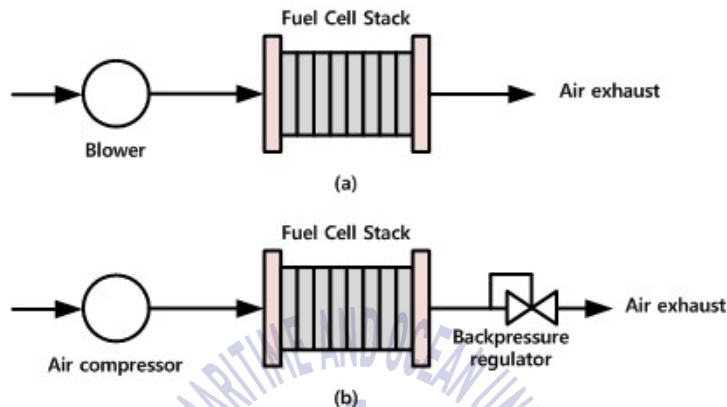


Fig. 3.2 Air supply system of fuel cell

공기와 수소는 대개 가습한 다음 연료전지 스택으로 공급되는데, 이는 수소의 경우 막의 애노드 쪽이 전기적 삼투압에 의해 마르지 않도록 하기 위한 것이다. 공기의 경우에는 도입 영역에서의 과잉 건조 기체가 전기화학 반응에서 수분이 생성되는 속도보다 빠른 속도로 수분을 제거하지 않도록 하기 위한 것이다. 공기 가습에는 기포를 물에 통과시키거나, 물이나 수증기를 직접 주입하는 방법, 수분 투과성 막을 통해 물과 열을 교환하는 방법 등이 있다.

수소공급 장치는 일반적으로 고압 실린더에 저장한다. 저장 압력은 200~450[bar]가 일반적이다. 수소를 연료전지에 공급하는 가장 간단한 방법은 데드·엔드 모드(dead-end mode)인데, 이 시스템은 Fig. 3.3(a)와 같이 고압의 저장 실린더에서 연료전지 운전압력까지 감압할 수 있는 압력 조절기만 있으면 된다. 소비전류가 증가하면 소비되는 수소의 양이 증가하기 때문에 수소의 농도는 줄어들게 된다. 데드·엔드 모드일 경우 지속적으로 수소를 공급하고 있기 때문에 다른 제어 없이 스택의 수소 압력에 따라서 수소를 공급할 수 있다.

Fig. 3.3(b)는 불활성 물과 불순물의 축적을 방지하기 위한 퍼지조작이 가능한 시스템이다. 하지만 수소 퍼지조작이 안전하거나, 혹은 시스템 효율 등의 이유로 불가능하거나 좋지 않은 경우에는 Fig. 3.3(c)와 같이 피동식 장치(ejector)나 능동식 장치(pump, compressor)를 이용하여 입구로 반송한다.

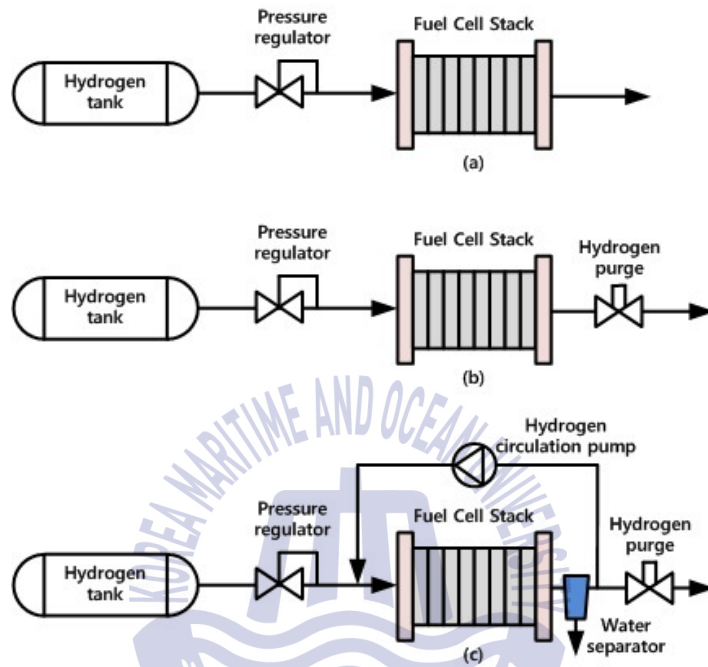


Fig. 3.3 Hydrogen supply system of fuel cell

연료전지 시스템에서는 스택의 반응물을 공급하는 것도 중요하지만 반응의 부산물인 물과 열을 연료전지의 종류와 상황에 맞게 적절히 관리하는 것도 중요하다. 물과 열은 연료전지 운전의 부산물이면서 동시에 부분적인 재사용이 가능한 에너지원이다. 냉각을 통해 스택의 열을 제거하여 일정한 온도를 유지하고, 이 물과 열은 반응 기체의 가습에 사용할 수 있고, 나머지 열은 열교환기를 통해 외부 난방이나 또 다른 용도로서 재사용될 수 있다.

시스템 안에 수분이 존재하게 되면 기온에 따라 동결될 수 있다. 이를 해결하기 위해 낮은 동력 수준에서는 주기적, 혹은 연속적으로 시스템을 운영하는 방법이 있다. 이 방법은 시스템 효율에 영향을 미치기 때문에 장기적인 의미에

서 실용적이라고 할 수는 없다. 다른 방법으로 모든 수분을 제거하는 방법을 사용하거나, 전열기를 설치하여 시스템의 온도를 일정하게 유지시켜 주는 방법을 이용해야 한다.

수송용인 경우 BOP 장비들의 운전을 위해서는 초기 시동 시에 위와 같은 배터리가 필요하며, 연료전지가 구동된 후에는 연료전지 출력에서 그 전력을 공급받은 후에 남은 전력으로 연료전지의 기동용 배터리를 충전한다. Fig. 3.4는 연료전지 시스템의 전체 구성도이다. 연료전지 시스템은 전기적인 출력을 내기 위해 전지 스택의 연료공급제어 및 전력 변환장치의 출력 제어가 동시에 연동되어 실행되어야 최적의 출력을 낼 수 있다. 연료공급제어는 연료인 수소의 농도, 수소 및 공기의 공급량 조절을 의미하며, 부하가 커지는 경우 수소의 양을 늘리고, 부하가 작아지면 수소의 양을 줄인다. 또 수소의 양을 조절함과 동시에 발전 효율을 향상시킬 수 있는 수소와 공기량의 비를 조절해야 한다. 이처럼 최적의 효율로 운영하기 위해서는 시스템 전체를 통합하여 제어할 수 있어야 하며, 여기에는 연료전지 시스템의 운전 상태 및 환경에 따라 적절하게 조절할 수 있는 제어기가 필요하다.

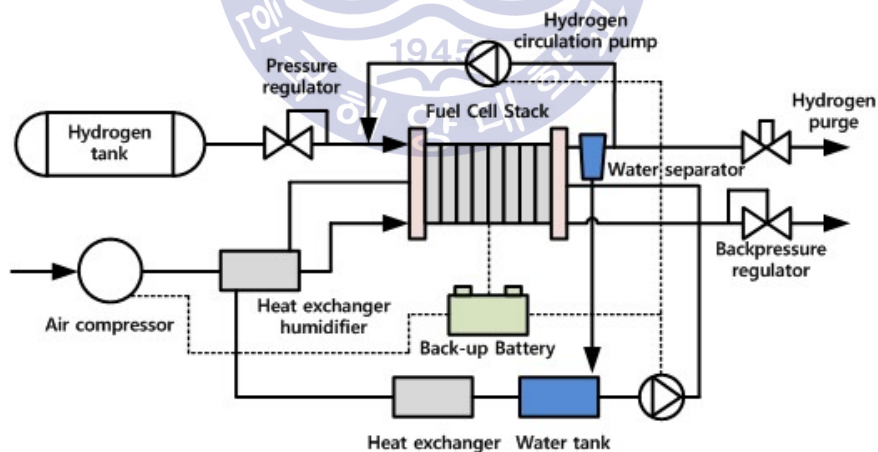


Fig. 3.4 Configuration of fuel cell system

3.1.3 연료전지의 특성

연료전지는 큰 전압 변동률을 갖는 저전압 대전류의 특성을 가지고 있다. 연료전지의 I-V 특성은 전류가 증가함에 따라서 전압은 감소하며, 전력은 증가한다. 이러한 I-V 특성 그래프는 작동 온도와 수소의 압력 등에 따라서 변하기 때문에 동작 환경을 일정하게 유지할 필요가 있다. 그래서 연료전지의 제어기는 온도와 수소, 공기 공급량을 일정하게 유지하는 방식으로 제어하며, 부하에 따른 조절이 이루어지지 않으면 실제 동작점은 연료전지의 I-V 특성 곡선을 이탈하게 된다. 또 연료전지의 부하 변화에 대한 응답 특성이 느려지는데, 그 이유는 화학 반응의 속도도 있지만 공기 및 수소의 유량제어를 위한 BOP는 응답 속도가 매우 느리기 때문이다. 이러한 부하 변화에 따른 느린 과도 응답(transient response)에 대한 연구와, 이를 개선하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

이와 같이 연료전지는 급변하는 부하에 대한 느린 응답 특성과 큰 전압변동률로 인해 단독으로 직접 부하에 연결되지 못한다. 대신 DC/DC 컨버터를 통해 보다 안정된 정전압을 유지하며 전력을 공급하게 된다. DC/DC 컨버터는 요구되는 부하 전위에 맞게 벡 컨버터(buck converter)나, 부스트 컨버터(boost converter), 벡-부스트 컨버터(buck-boost converter) 등을 사용한다. 또한, 연료전지 전력시스템은 보다 안정적인 전력 공급을 위해서 슈퍼 커패시터(super capacitor), 플라이휠(flywheel)과 같은 에너지 저장장치를 이용하여 급변하는 부하를 보상하는 시스템이 필요하다.

그러므로 연료전지의 전기 계통 부분의 가장 일반적인 기능은 ‘전압 조절’이다. 전력 시스템은 요구되는 부하 전위에 맞춰서 전압을 제어해야 하기 때문에 시스템의 구성과 특징은 용도에 따라 달라진다. 사용하는 전원의 종류에 따라 직류전원과 교류전원으로 구분될 수 있으며, 사용되는 시스템에 따라 수송용 발전과 고정식 발전으로 구분된다. 또한, 상용 혹은 기존의 전원과의 연계성에 따라 계통연계식과 독립형으로 구분되기도 한다.

Fig. 3.5는 전형적인 직류전원용 연료전지 전력시스템이다. 이 시스템은 직류전원을 내는 연료전지와 부하에 따라 전압을 조절하는 DC/DC 컨버터, 그리고

연료전지 출력보다 큰 전력을 공급하거나 급격한 부하를 보상하기 위한 배터리로 구성된다. DC/DC 컨버터의 경우 부하 측에 요구되는 전위에 맞춰서 설정되며, 배터리의 경우 스택을 조절하여 부하 측에 요구되는 전위에 맞추거나 DC/DC 컨버터를 사용하여 전압을 맞추어 준다. 여기서 배터리는 급변하는 부하에 대한 응답 특성이 느린 연료전지 특성을 보완하고자 설치되며, 연료전지가 부하 변화를 추종할 때까지 전력을 공급할 수 있다. 또한 방전된 배터리의 경우 추후 연료전지가 전력의 여유가 있으면 다시 충전하게 된다. 부하의 변동이 심한 경우는 연료전지의 크기를 평균 전력과 피크 전력의 중간 수준으로 만들며, 일정 전력 수준 이상으로 부하가 증가하면 연료전지와 배터리가 같이 작동하여 부족한 전력의 차이를 보충하도록 한다. 마찬가지로 부하가 연료전지의 설정 전력 이하로 떨어지게 되면 자동으로 배터리를 충전하도록 운영된다.

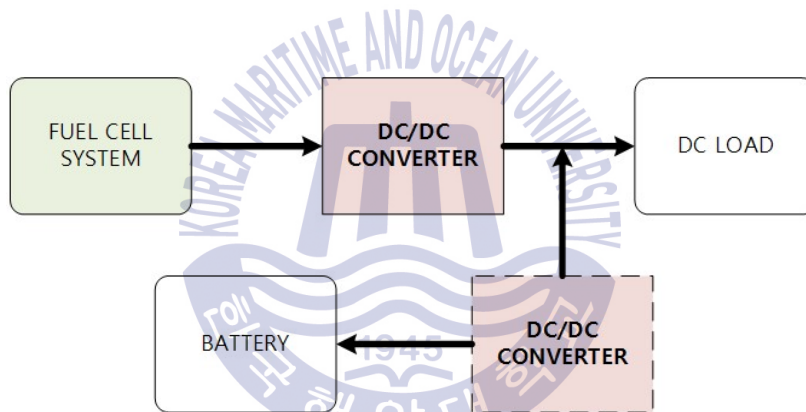


Fig. 3.5 Configuration of fuel cell power system for DC power supply

만약 AC 전원을 필요로 하는 부하일 경우, 기본 전력시스템에서 DC/AC 인버터가 필요하게 된다. Fig. 3.6은 AC 전원용 연료전지 전력 시스템의 구성도이다. 이러한 시스템은 단독으로 운전하거나 전력망(grid), 혹은 발전기와 병렬로 운전되기도 한다. 후자의 경우는 병렬운전을 위한 여러 조건을 만족할 수 있는 장비가 추가되어야 한다. 병렬운전을 위한 조건에는 전압과 주파수가 일치하고 위상이 같으며, THD(Total Harmonic Distortion)가 전력망과 같거나 좋아야 한다. 그리고 안전성 측면에서 전력망이 중단되었을 경우에 자동적으로 차단할 수 있는 시스템도 필요하다. 연료전지 시스템이 전력망과 병렬로 연결되었을

때는 기본적인 부하를 연료전지에서 공급하고, 필요한 경우에는 전력망으로부터 전력을 공급받는다. 하지만 연료전지에서 전력망으로 반송하지는 않으며, 전력망이 있기 때문에 시동 배터리는 필요하지 않다. 계통 연계 방식은 연료전지가 부하에 전력을 공급하는 동시에 잉여 전력을 전력망으로 반송할 수 있도록 양방향 전력망이 가능하다. 이는 최근 주목받고 있는 스마트 그리드의 전력망에 활용될 수 있으며, 이를 위해서는 상호 연결 기준이 필요하다. 또 독립형은 에너지 저장 장치와 연계하여 전력을 공급하며, 부하의 변화에 순응적으로 반응할 수 있어야 한다. 가정용 연료전지 시스템은 주로 계통 연계 방식을 이용하는데, 연료전지는 일정한 출력을 내도록 하고 부하의 변화에 맞게 필요한 전력을 전력망으로부터 공급받는 방식이다.

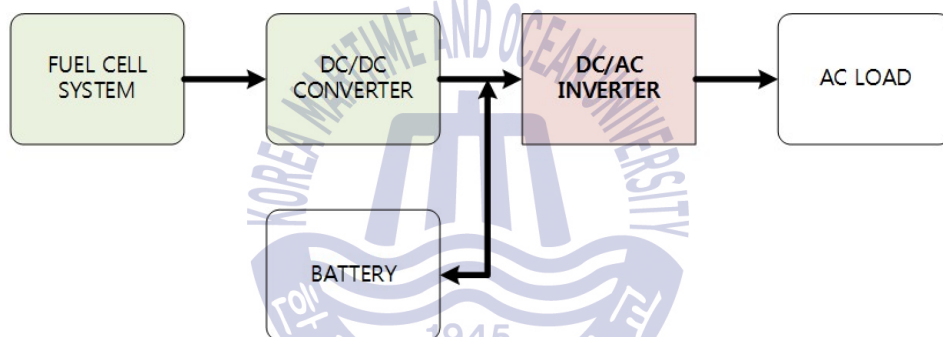


Fig. 3.6 Configuration of fuel cell power system for AC power supply

수송용에 적용된 연료전지 시스템은 자동차용 연료전지 시스템이 가장 많이 연구되고 있으며 상용품 또한 개발되어 있다. Fig. 3.7은 일반적인 자동차용 연료전지의 전력시스템 구성도이다. 기본적인 연료전지의 운용은 가정용 연료전지와 비슷하다. 하지만 자동차용의 경우 가정용보다 부하의 변동이 잦고, 부하가 변동하는 폭 또한 크기 때문에 배터리와 같은 에너지 저장 장치가 반드시 필요하다. 그리고 운행 중 제동할 경우 발생하는 회생 전류를 양방향 DC/DC 컨버터를 통해서 배터리에 충전할 수 있도록 설계되었다. 기본적인 자동차용 연료전지 시스템의 운용 전략을 보면 자동차에서 요구되는 에너지와 배터리의 충전상태(SOC: State of Charge)를 측정하여 동작모드를 결정하고, 이에 적합한

연료전지와 배터리의 사용을 결정한다. 연료전지 시스템은 낮은 출력을 요구하는 구간에서는 효율이 좋지 않기 때문에 적은 전력이 요구되는 상황에서는 배터리만으로 동작하고, 평균적인 전력이 요구되는 상황에서는 연료전지와 배터리가 함께 동작하도록 한다. 배터리의 충전상태가 낮은 경우에는 연료전지만으로 전력을 공급하도록 하고, 잉여 전력으로는 배터리를 충전하도록 한다. 최대 전력을 요구하는 상황에서는 연료전지와 배터리가 함께 동작하여 부하에 맞게 전력을 공급한다.

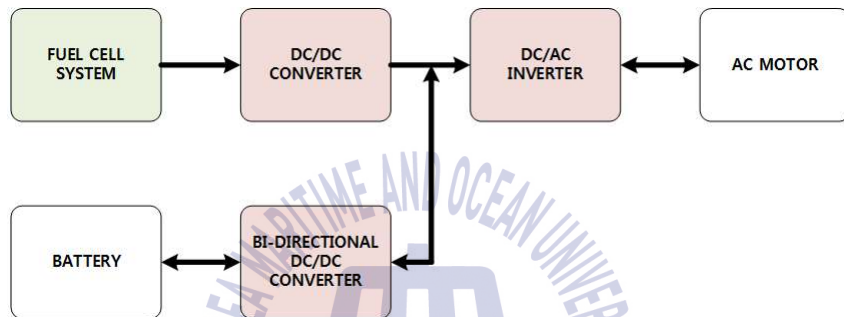


Fig. 3.7 Configuration of fuel cell power system for ship

이러한 연료전지 전력 시스템은 전력 변환장치의 효율 증대와 연료전지 시스템의 최적 운영제어, 리플 전류 최소화를 통해 성능을 향상시킬 수 있다. 전력 변환장치의 효율을 최대화하기 위해서는 전력변환 단계를 최소화하고, 영전위 스위칭(ZVS: Zero Voltage Switching)을 통해 스위칭 손실을 최소화하는 단계가 필요하다.

3.1.4 연료전지의 시스템의 구조 및 선정

연료전지의 부하 특성상 연료전지에서 발전되는 전력을 추진 시스템의 모터에 직접 연결하는 방법은 불가능하다. 그러므로 연료전지에서 발전되는 전력은 배터리와 연계되어 추진 시스템의 모터로 공급되어야 한다. 연료전지와 배터리가 같이 연계되는 시스템은 다음과 같다.

가) 병렬 하이브리드 구조

Fig. 3.8의 병렬 하이브리드 구조는 배터리와 연료전지를 병렬로 사용한다. 연료전지를 주 전력원으로 이용할 경우, 연료전지를 기본 전력공급원으로 이용하고, 연료전지 선박이 가속 및 감속과 같이 급변하는 부하의 변동이 있을 경우에만 배터리가 전력을 공급할 수 있도록 한다. 이러한 시스템은 배터리와 연료전지를 병렬로 이용한다. 이 구성에서 DC/DC 컨버터는 풀 브릿지 DC/DC 컨버터를 이용한다. 또한 배터리는 연료전지와 부하측에 직접 연결되는 구조를 지니며, 배터리가 급변하는 부하를 감당할 수 있으므로 빠른 응답특성을 나타낼 수 있다.

연료전지는 시동되는데 발전기에 비하여 상대적으로 오랜 시간이 걸린다. 그러므로 연료전지가 시동되는데 걸리는 시간 동안 배터리에서 부하의 수요 전력을 감당하며, 연료전지가 시동이 걸린 후에 연료전지에서 부하의 수요 전력을 감당할 수 있다. 그러나 연료전지의 높은 전압에 맞추어 배터리를 선정하여야 하므로 배터리의 전압이 높아지며, 이에 따른 배터리의 부피가 커지는 단점이 있다.

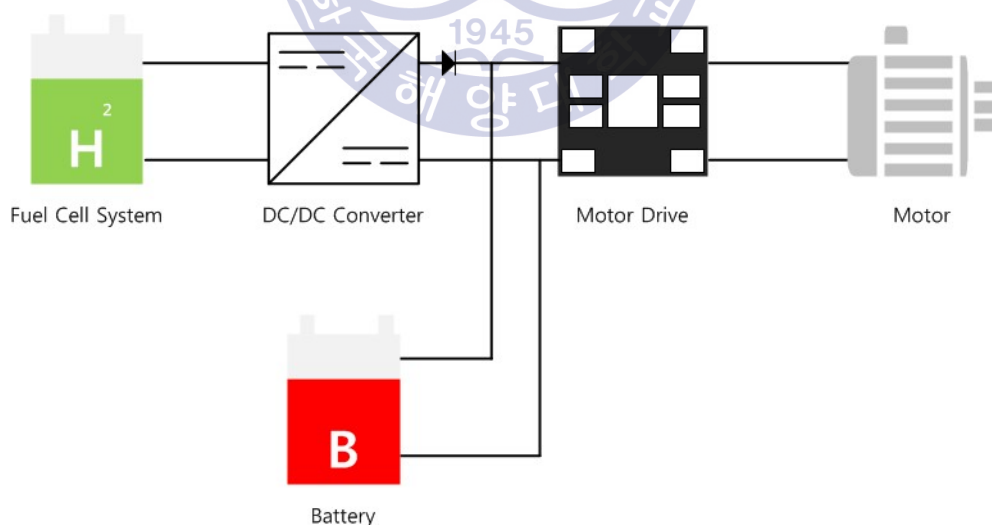


Fig. 3.8 Parallel hybrid power system

나) 직렬 하이브리드 구조

Fig. 3.9의 직렬 하이브리드 구조는 배터리와 연료전지는 직렬로 이용하며, 연료전지 선박에서 이용되는 모든 전력을 배터리가 감당하는 특성이 있다. 연료전지의 출력 변화는 배터리의 충전 상황(SOC)에 따라 달라지지만 충전부하이기에 급격한 부하변화가 없어 안정적이다. 이를 위해서는 배터리 관리시스템과 배터리 충전 시스템이 중요하다. 장점은 병렬 하이브리드 구조와 비슷하며, 배터리의 전력 소모로 인해 재충전 빈도가 빠르므로 연료전지의 출력용량이 더 커야한다. 단점은 병렬 하이브리드 구조와 마찬가지로 배터리 전압이 올라가기 때문에 부피와 가격이 증가한다.

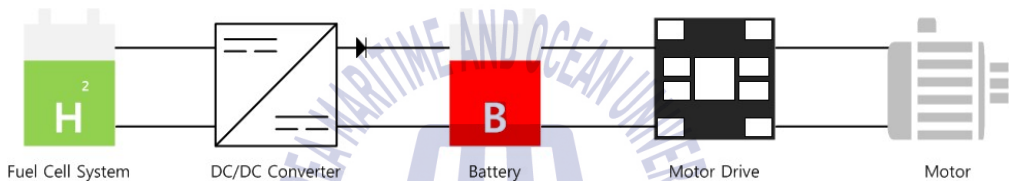


Fig. 3.9 Series hybrid power system

다) 병렬 에너지원 공급 시스템

Fig. 3.10은 연료전지와 배터리를 병렬 에너지원으로 이용하는 방법이다. 직렬 하이브리드 구조와 비교하여 배터리를 낮은 전압의 에너지원으로 이용할 수 있는 장점이 있으나 연료전지의 특성상 전압 변동률이 크기 때문에 이에 맞춰 배터리를 맞춰야 하며, 배터리 관리가 어려운 단점이 있다.

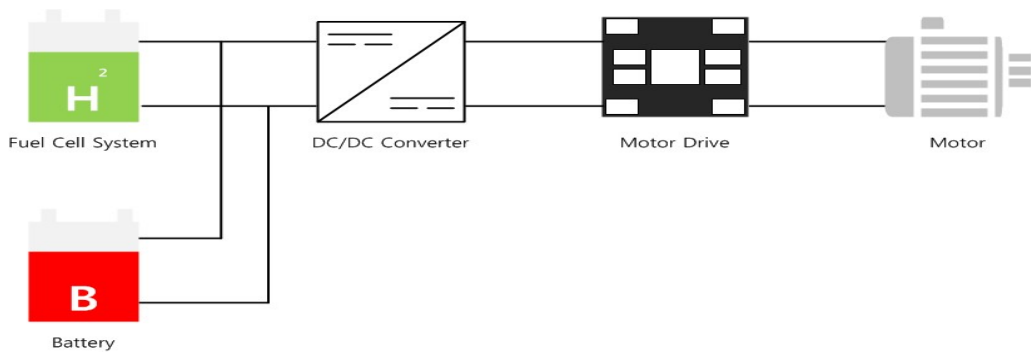


Fig. 3.10 Parallel energy source power system

라) 양방향 DC/DC 컨버터를 추가한 병렬 하이브리드 구조

Fig. 3.11의 병렬 하이브리드 구조는 양방향 DC/DC 컨버터를 추가한 병렬 하이브리드 구조의 장점을 모두 지닐 수 있으며, 출력되는 배터리의 전압을 제어할 수 있기 때문에 배터리의 전압을 부하 요구 전압으로 맞춰줄 필요가 없다. 추진기에서 회생 전류가 발생하면 양방향 DC/DC 컨버터를 통해서 배터리로 충전할 수 있으며, 배터리 출력의 전압을 조절할 수 있기에 연료전지 측의 DC/DC 컨버터는 정전압을 유지한 상태로 전력 분배를 배터리의 양방향 DC/DC 컨버터를 통해서 제어한다. 그러나 급변하는 부하를 감지하여 충·방전을 양방향 DC/DC 컨버터가 제어해야 하므로 부하 측과 직결된 구조보다는 능동적으로 대응하지 못한다. 또한, 이 시스템은 모든 조건의 상태에서 운전이 가능하지만 가격이 높다는 단점이 있다.

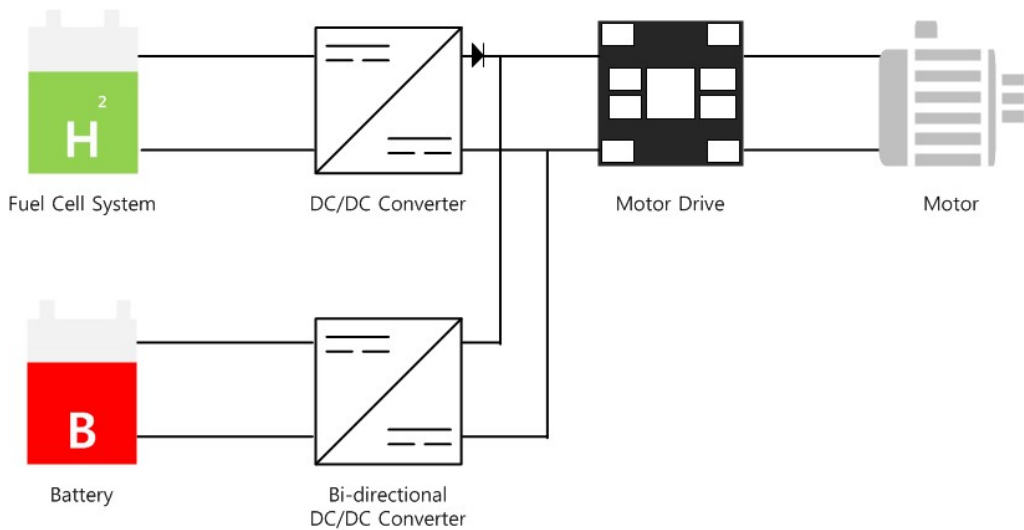


Fig. 3.11 Power system using the bi-directional DC/DC converter

마) 양방향 DC/DC 컨버터와 슈퍼 커패시터를 추가한 병렬 하이브리드 구조

Fig. 3.12는 병렬 하이브리드 구조에 양방향 DC/DC 컨버터와 슈퍼 커패시터를 추가한 구조이다. 슈퍼 커패시터를 부하 측에 직접 연결하고, 배터리는 양방향 DC/DC 컨버터를 통해서 연결된다. 슈퍼 커패시터는 높은 전력에서 충전과 방전 효율이 뛰어나며, 긴 운전 시간을 가지고 있다. 그렇기 때문에 배터리는 연료전지의 정격출력을 위해 제어를 하고, 급변하는 큰 부하나 갑자기 발생한 회생전류를 슈퍼 커패시터가 감당한다.

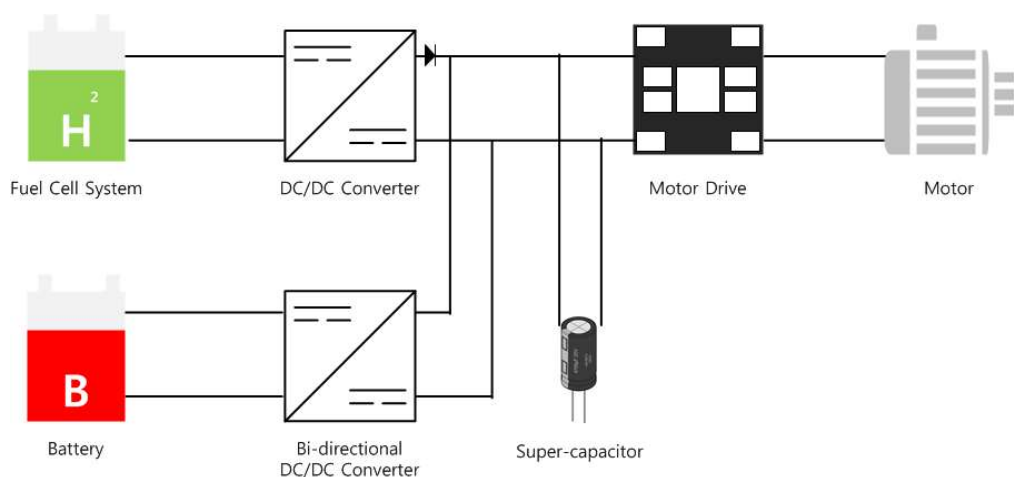


Fig. 3.12 Power system using the super-capacitor

소형선박용 연료전지 전력시스템을 설계하기 위하여 해상 환경의 예측 불가능한 부하 변화와 입출항 상황의 급격한 부하 변화를 감당할 수 있는 병렬 하이브리드 구조로 선정하였으며, 병렬 하이브리드 구조 중 Fig. 3.11처럼 배터리 측에 양방향DC/DC 컨버터를 설치한 병렬 하이브리드 구조에 양방향 DC/DC 컨버터를 추가한 시스템을 검토하였으나, 이 시스템은 급격한 부하 변화에 따라 승압모드와 감압모드로 동작하여 충·방전을 선택하기 때문에 상황과 배터리의 SOC를 고려한 복잡한 제어가 요구되고, 저전압에서 고전압으로 변환하기 적합한 절연형 풀 브릿지 컨버터를 연료전지와 배터리 모두 사용하기 때문에 소형선박과 해양레저선박에 적용하기에는 경제적으로 적합하지 않는 것으로 검토되었다.

그러므로 본 논문에서는 병렬 하이브리드 구조를 이용한 전력 시스템을 구성하였으며, 연료전지의 출력 DC/DC 컨버터를 배터리 전압에 맞추어 제어함으로써 부하 변화에 따른 연료전지의 출력 변화를 최소화 하고자 하였다.

3.2 선박용 연료전지 전력 시스템

3.2.1 연료전지 전력시스템

병렬 하이브리드 구조를 연료전지 선박에 적용하여 연료전지 전력시스템을

구성하였다. Fig. 3.13은 연료전지 선박의 시스템 구성이다. 연료전지 선박의 시스템은 연료전지에 수소를 공급할 수 있는 HTS(Hydrogen Tank System), 선박에 전력을 공급해주는 FCS(Fuel Cell System), 연료전지의 응답특성을 개선할 수 있게 도와주는 BMS(Battery Management System), 선박내부 전력을 제어할 수 있는 PMS(Power Management System), 선박의 추진을 담당하는 PCS(Propulsion Control System) 그리고 이들을 통합 제어 및 모니터링하는 모니터링 및 제어 시스템으로 구성되어 있다. FCS와 PMS는 RS-485 통신을 이용하여 제어 및 상태를 모니터링하고, PCS는 4~20[mA]의 전류신호를 기반으로 제어를 진행하며, 연료전지의 응답특성에 맞도록 선내부하 및 PCS를 제어한다. 또한, 안정적인 선박 추진시스템에 전력공급을 위해 BMS와 연동하여 선내 필요 전력을 공급하며 CAN 통신을 통하여 배터리의 충전상태 등을 확인할 수 있다.

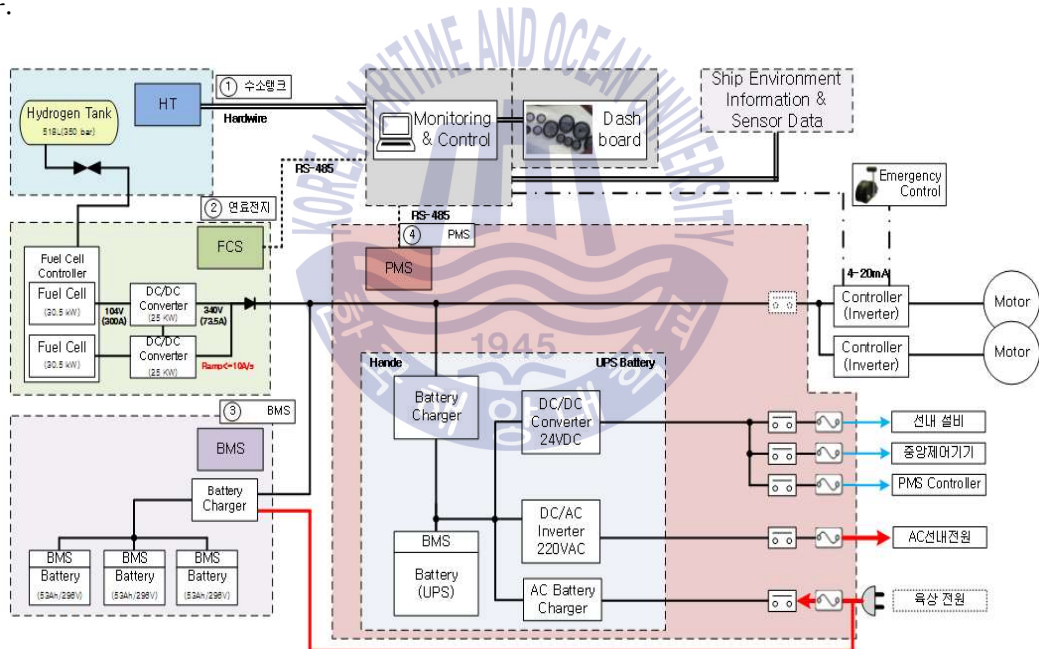


Fig. 3.13 Fuel cell ship system diagram

가) 제어기 선정

연료전지선박의 모니터링 및 제어 시스템은 선박의 운항 안정성과 승객의 안전을 확보해야 한다. 그러나 기존의 Windows 기반의 OS 등의 경우 제어시스템의 정시성을 확보하기 어려운 단점이 있다. 그러므로 연료전지 선박의 모니터

링 및 제어 시스템은 RT(real-time) OS를 이용하여 제어 시스템을 구성하였다.

National Instrument(NI)사의 NI-cRIO 9068은 Linux기반의 real-time OS를 탑재하고 있어 정밀한 제어시스템에 적용 가능하다. 또한 Artix-7 FPGA를 탑재함으로써 FPGA구동이 용이하도록 되어있다. 구성은 Fig. 3.14와 같이 FPGA와 RT OS가 있는 RT부분으로 구성된다.

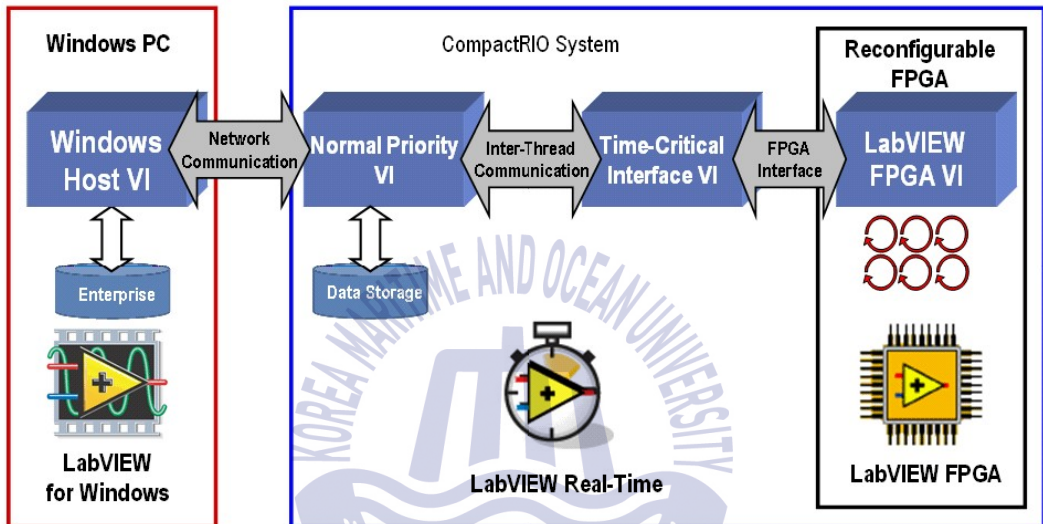


Fig. 3.14 Compact RIO system diagram

FPGA에서는 모든 통신 및 아날로그 I/O신호를 처리할 수 있고, RT 시스템에서는 메모리를 통하여 FPGA 접근이 가능하다. 이에 따라 데이터 저장 및 처리가 가능하게 된다. RT OS에서 처리된 데이터는 Window 기반의 PC에 데이터를 TCP/IP통신을 통하여 송신 및 수신할 수 있다. NI사의 Compact RIO의 경우 다음과 같이 세 가지 방법으로 시스템을 구성할 수 있다.

1. FPGA 프로그램을 통해서만 모든 데이터 및 제어를 처리하는 경우
2. RT 프로그램의 scan engine을 통하여서 FPGA에 접근하여 사용하는 경우
3. FPGA, RT 모두를 사용하여 프로그래밍하는 경우

본 논문에서는 RT OS를 선정하였으므로 두 번째 방법으로 시스템을 구성하였다. 다음 Fig. 3.15는 중앙제어기로 선정된 NI-cRIO 9068을 나타낸 것이며 Table 3.2는 그것의 사양이다.



Fig. 3.15 NI-cRIO 9068

Table 3.2 Specifications of NI-cRIO 9068

구분	치수
Network interface	Ethernet port : 2[ea], 10[BaseT], 100[BaseTX], 1000[BaseTX] ethernet RS232 port : 2[ea] RS485 port : 1[ea]
Memory	Non-volatile : 1[GB], DRAM : 512[MB]
Internal real-time clock	Precision : 200[ppm], 35[ppm] to 25[°C]
Power requirements	Power supply : 55[W], Power consumption : 35[W], Voltage requirements : 9~35[V]
Environment	Operating temperature : -20 ~ 55[°C]
Impact and Vibration	Random wave (IEC 60068-2-64) : 5[grms], 10 ~ 500[Hz] Sine wave (IEC 60068-2-6) : 5[grms], 10 ~ 500[Hz]

나) 통신 및 I/O 모듈 선정

Compact RIO는 사용자가 원하는 사양으로 Module(C-Series Module)을 선택하여 구성이 가능하므로 시스템 구성의 호환성이 높다. 본 논문에 사용된 통신 및 I/O Module은 8개로 구성되며 필요한 I/O 개수는 Table 3.3과 같다.


Table 3.3 I/O configuration


구분	DI		DO		AI		AO	
	total	use	total	use	total	use	total	use
NO. of CH	32[ch]	15[ch]	32[ch]	20[ch]	8[ch]	2[ch]	8[ch]	2[ch]
Spare CH	17[ch]		12[ch]		6[ch]		6[ch]	

I/O의 개수 및 사용용도를 정의한 후 Compact RIO에 이용될 모듈을 선정하였다. 선정된 I/O Module 및 사양을 Table 3.4에 정리하였다.

Table 3.4 I/O Module & Specification

I/O Module	Specification
 <p>NI-9871</p>	<p>NI-9871은 FCS 및 PMS와 RS-485, RS-422 통신을 이용할 수 있게 구성하였다. 최대 포트 수는 4개이며 포트당 최대 31개 디바이스에 연결이 가능하다. 또한 최대 보율(Baud Rate)은 3.6864[Mbps]가 지원된다.</p>
 <p>NI-9870</p>	<p>NI-9870은 BMS의 CAN 2.0B통신을 RS-232c 통신으로 변환하여 수신하기 위하여 이용된다. 포트 수는 4개이며 최대 보 전송속도는 961[Kbps]이다. 또한 포트별 64B UART FIFO 버퍼 내장이 가능한 장점이 있다.</p>

I/O Module	Specification
 <p data-bbox="308 434 418 473">NI-9877</p>	<p data-bbox="583 202 1200 473">NI-9877은 연료전지선박에 설치된 여러 장비의 신호 전달 및 콘솔 신호를 전달하기 위하여 이용된다. 32개 채널 이용이 가능하며 출력 전압범위는 5~60[VDC]이다 또한 채널당 최대 625[mA]라는 높은 안정성을 지니며 12[V] 및 24[V] 전압 레벨의 호환이 가능하다는 장점이 있다.</p>
 <p data-bbox="308 772 418 811">NI-9425</p>	<p data-bbox="583 521 1200 801">NI-9425는 콘솔 신호 입력 및 장비신호 입력을 수신하기 위하여 이용된다. 채널은 32개 채널의 이용이 가능하며 출력 전압범위는 5~60[VDC]이다 또한 산업 표준 37[pin] D-sub 커넥터를 이용하여 높은 호환성을 지닌다. 그리고 12[V] 및 24[V] 전압 레벨의 호환이 가능하다는 장점이 있다.</p>
 <p data-bbox="308 1091 418 1130">NI-9265</p>	<p data-bbox="583 850 1200 1130">NI-9265는 텔레그래프의 신호를 전달하며 추진 모터의 속도 제어를 위하여 이용된다. 4개의 채널 이용이 가능하며 출력 전류범위는 0~20[mA]이다 또한 100[kS/s]의 동시 업데이트가 가능하며 16[bit] 해상도를 가져 상대적으로 정밀도가 높은 장점이 있다.</p>
 <p data-bbox="308 1477 418 1516">NI-9201</p>	<p data-bbox="583 1226 1200 1458">NI-9201은 텔레그래프의 신호를 입력받을 때 이용된다. 8개 채널 이용이 가능하며 입력 전압범위는 -10[VDC] ~ +10[VDC]이다. 또한 500[kS/s]라는 직접 샘플링 속도를 가지고 있으며 12 비트 해상도를 가져 상대적으로 정밀도가 높은 장점이 있다.</p>

I/O Module	Specification
 <p>NI-9482</p>	<p>NI-9482는 허용 전류 적용을 위해 릴레이 모듈이 이용되었다. 주로 inverter의 run/ stop 신호를 전송하기 위해 적용하였으며, 4개의 채널 이용이 가능하며 30VDC(1.5[A]), 60VDC(1[A]), 250VAC(1.5[A])의 특성이 있다.</p>

다) 중앙 제어기 설계

제어기에 들어갈 CompactRIO 및 module의 선정 후 중앙제어기의 신호계통도를 설계하였다. 다음 Fig. 3.16은 중앙제어기의 신호계통도 이다. 신호는 통신신호와 hardwire 신호로 분류된다. 우선 제어기 함에 집중될 수 있게 중앙집중형으로 구성되어 있으며 FCS는 제어기함으로 RS-485 통신을 송신하며 F.C(fuel cell) 상태, 스택상태, 컨버터상태, F.C 에러, 컨버터 에러, 충전기상태, 기기 기동, 기기 정지 등 약 70개 항목의 데이터를 송신한다. 그리고 PMS는 제어기함으로 RS-485통신을 이용하며 SOC 상태 1개, UPS 에러, 스위치(switch) 상태 값 30개, 스위치 제어 값 30개 그리고 기타 70개 항목의 데이터를 송신한다. 그리고 BMS는 CAN 2.0B 통신을 이용하여 제어기함으로 데이터를 송신하며 송신되는 데이터는 SOC 값 3개, pack 전압 16개, pack 전류 16개, pack 온도 16개, 경고 21개, 에러 21개, 릴레이 상태, 상태요청 그리고 기타 약 100여개의 데이터를 송신한다. HTS는 TCP/IP 통신을 이용하여 제어함에 데이터를 송신하며 탱크 압력 2개, 탱크온도 14개 수소감지여부 4개, 비상상태여부, 밸브 열림 상태, 상태요청 값을 송신한다.

hardwire 신호의 경우 FCS는 F.C 전원인가 여부 및 유지보수용 통신라인이 제어 콘솔로 연결된다. 그리고 BMS내부 battery 충전기에서 충전/방전 선택, DC/AC 선택, Reset 선택, 충전 중 알림, 에러 알람값을 제어 콘솔로 연결한다. 그리고 HTS는 밸브 개폐여부, 비상여부, 알람, 탱크압력2개를 제어 콘솔로 송신한다. 그리고 기타 기기 역시 제어 콘솔로 연결된다. 마지막으로 중앙제어기는 F.C 시작여부, F.C 오류여부, BMS SOC값, BMS 에러값, S.W 제어신호, S.W 상

태신호, UPS-SOC 값, UPS-에러값 그리고 수소 누출상태를 제어 콘솔로 송신한다.

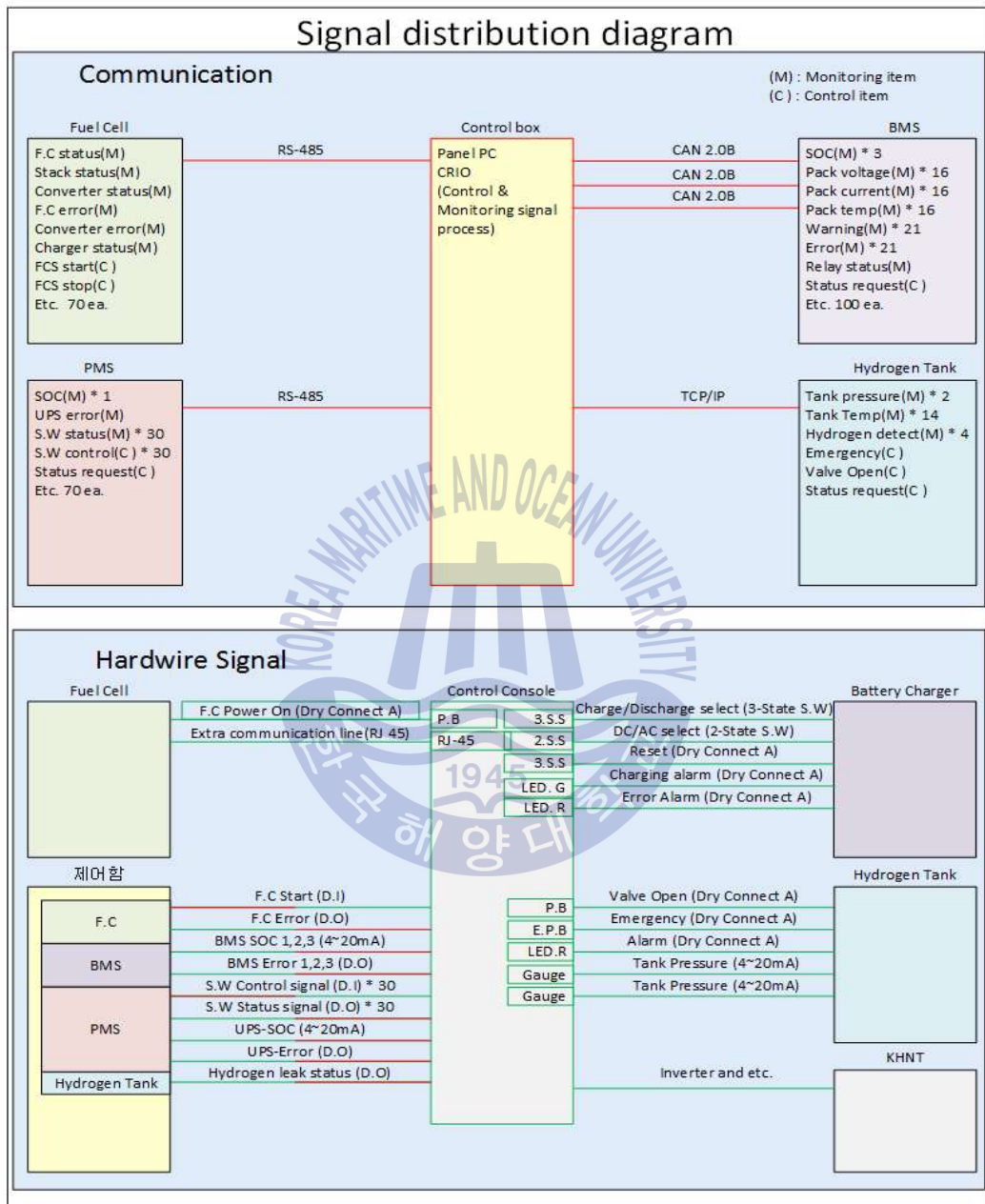


Fig. 3.16 Signal diagram

Fig. 3.17은 중앙제어기함 결선도를 나타낸다.

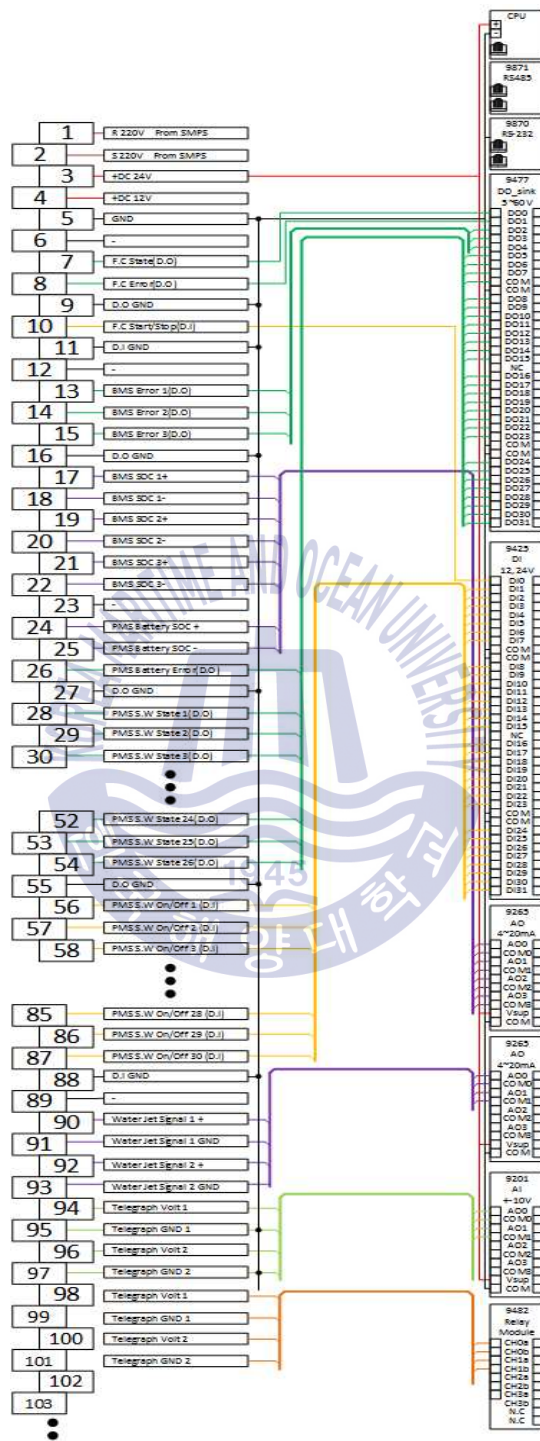


Fig. 3.17 Central controller diagram

3.2.2 연동전력 시스템

가) 연료전지

연료전지 선박에서 연료전지는 주 추진장치에 전력을 공급하는 매우 중요한 장비이다. 중앙 제어기는 연료전지의 기동/정지뿐만 아니라 연료전지의 동작 상태(정상동작, 비상상태 등)를 사용자가 직관적으로 알 수 있도록 하여야 한다. 탑재되는 연료전지는 25[kW]의 연료전지 2 팩(pack)이 탑재되게 되며 선내 추진시스템에 전력을 공급하게 된다. 2개의 연료전지 시스템 내 통신 연계기에서 하나의 데이터로 모아져 중앙제어기와 통신하게 되며 연료전지뿐만 아니라 배터리 충전시스템의 정보도 함께 중앙제어기로 전달하게 된다. 연료전지와 중앙 제어기의 송, 수신 신호는 Table 3.5와 같다.

Table 3.5 Fuel cell signal

A name of equipment	Signal(part)function	Signal(part)name	Signal Type	connection Equipment
Fuel cell	F.C power impression	F.C Power	green LED	console
	F.C power status	F.C Power(LED)	toggle type S.W	console
	F.C start/stop	F.C Start/Stop	push button	main control system
	F.C operating status	F.C Start/Stop(LED)	green LED	main control system
	F.C Fault signal	F.C Fault(LED)	red LED	main control system
	Self-check network port	RJ-45	RJ-45	console

사용자가 보다 편리하고 직관적으로 연료전지의 상태를 확인하기 위해 연료 전지로부터 송신 받은 데이터를 바탕으로 GUI기반의 monitoring 시스템을 구축하였다. 연료전지와 중앙제어기와의 데이터는 통신을 통하여 상호 정보를 교환하며, 통신 규격은 아래사항을 따르며, 명령 및 데이터는 Table 3.6과 같다.

- RS-485(two wire 방식(TRx+, TRx-, GND)로 연결됨
- 9,600[Bps], 8 data [bit], no parity, no flow control, 1 stop [bit]
- 연료전지는 중앙제어기에 충전제어기의 상태를 포함하여 데이터를 전송 함

- 중앙제어기는 연료전지 배터리 팩 상태를 포함하여 데이터를 요청 함
- 마스터(선박중앙제어기)의 요청에 슬라브(fuel cell)는 200[ms]이내에 응답 함

Table 3.6 Communication protocol between fuel cell and central controller

상태요청 (REQ001)	0x01	1 byte 고정.			상태 요청 명령 및 배터리 팩상태 전달 배터리팩 고장표시: 0(정상), 1(고장)		
		Bit 순서		값			
		7	1				
		6	1				
		5	1				
		4	1				
		3	0				
		2	배터리 팩A 고장				
		1	배터리 팩 B 고장				
		0	배터리 팩 C 고장				
상태응답 (RES001)	0xA1	A	status	Spower	stack V	연료전지 현재 상태표시 ● Status: 0x00(정지), 0x01(준비중), 0x02(발전중)0x03(정지중), 0x04(비상상태), 0x05(충전중) ● SPower(스택출력): 0~65535 [W] ● Stack V(스택전압): 0 ~ 1000[V] ● Stack C(스택전류): 0~ 1000[A] ● Cpower(컨버터출력): ~65535[W] ● Conv V(컨버터전압):0~1000[V] ● Conv A(컨버터전류):0~1000[A] ● Temp1(스택온도): 0~ 255[도] ● Temp2(스택온도): 0~ 255[도] ● 연료전지 에러: (별도 기술) ● 컨버터 에러: (별도 기술) ※ 앞부분 28[byte]는 연료전지 A모듈, 가운데 28[byte]는 연료전지B모듈의 상태를 표시하며, 뒷부분의 14[byte]는 충전제어기의 상태를 표시한다. ● 충전제어기 현재 상태 표시 ● Start/stop: 0x00(정지), 0x0F(충전중) ● AC Charge relay: 0x00(off), 0x0F(on) ● DC Charge relay: 0x00(off), 0x0F(on) ● Battery1~3 Chg relay: 0x00(off), 0x0F(on) ● Battery1~3 Dischg relay: 0x00(off), 0x0F(on) ● Emergency Stop: 0x00(정상), 0x0F(이상발생) ● BMS Fault: 0x00(정상), 0x0F(이상발생) ● Error code (에러코드): 0~255(별도 기술) ● 출력전압: 0 ~ 800[V] - big endian 표시	
			1[byte]	2[byte]	2[byte]		
			stack C	Cpower	Conv V		
			2[byte]	2[byte]	2[byte]		
			Conv C	Temp1	Temp2		
			2byte	2byte	2byte		
			연료전지 에러	컨버터 에러	Resv1		
		1[byte]	8[byte]	2[byte]			
		B	status	Spower	stack V		
			1[byte]	2[byte]	2[byte]		
			stack C	Cpower	Conv V		
			2[byte]	2[byte]	2[byte]		
			Conv C	Temp1	Temp2		
			2[byte]	2[byte]	2[byte]		
			연료전지 에러	컨버터 에러	Resv2		
		1[byte]	8[byte]	2[byte]			
		충전제어기	Start/stop				1[byte]
			AC Charge relay				1[byte]
			DC Charge relay				1[byte]
			Battery1 Chg relay				1[byte]
			Battery2 Chg relay				1[byte]
			Battery3 Chg relay				1[byte]
			Battery1 Dischg relay				1[byte]
			Battery2 Dischg relay				1[byte]
			Battery3 Dischg relay				1[byte]
			Emergency Stop				1[byte]
			BMS Fault				1[byte]
			Error code				1[byte]
			출력전압				2[byte]]

기기기동 (REQ002)	0x02	0xFE(1 [byte] 고정)	연료전지 시작 명령
기동응답 (RES002)	0xA2	0x0E (1 [byte] 고정)	연료전지 시작 명령에 대한 응답 (명령이 수신되었다는 의미)
기기정지 (REQ003)	0x03	0xFE(1 [byte] 고정)	연료전지 정지 명령
정지응답 (RES003)	0xA3	0x0E(1 [byte] 고정)	연료전지 정지명령에 대한 응답 (명령이 수신되었다는 의미)

연료전지 고장 및 중앙제어기의 고장에 따른 선박 위험을 최소화하기 위해 에러 발생 시 해당 연료전지는 자동으로 발전 동작을 중지하고 냉각 및 정지 상태로 들어가게 된다. 또한, 통신 연결이 장기간(15초) 이상 끊어짐이 발생하는 경우 연료전지는 발전을 중지하고 대기상태로 다음 명령을 기다리게 된다. 연료전지 선박은 특성상 매우 위험한 수소 연료를 사용함에 따라 선박 안전을 위해 연료전지로부터 수소가스가 새거나 화재, 폭발 등을 사전에 방지하기 위해 위와 같은 동작을 수행하게 된다.

연료전지 또는 연료전지 컨버터에서 에러가 발생할 경우 연료전지는 중앙제어기이고 에러 정보를 송신하게 되고, 중앙제어기는 에러 정보를 수집 및 저장하게 된다. 이렇게 수집 된 데이터를 바탕으로 추후 문제 발생 원인을 분석하고 조치를 취할 수 있도록 하였다. Fig. 3.18은 연료전지와 중앙제어기간의 RS-485 통신 파형을 나타낸다.

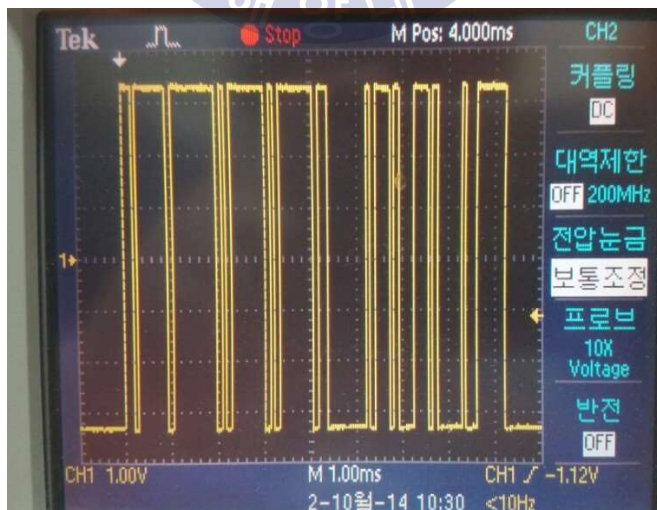


Fig. 3.18 Communication signal between fuel cell and central controller

중앙제어기는 연료전지로부터 받는 데이터를 RT(real time)단에서 처리하게 함으로서 monitoring PC가 고장 난 상태에서도 안정적으로 선박 운항이 가능하도록 하였다. 다음 Fig. 3.19는 데이터 수집 프로그램을 나타내며, Fig. 3.20은 사용자 편의 기반의 GUI 화면을 나타낸다.

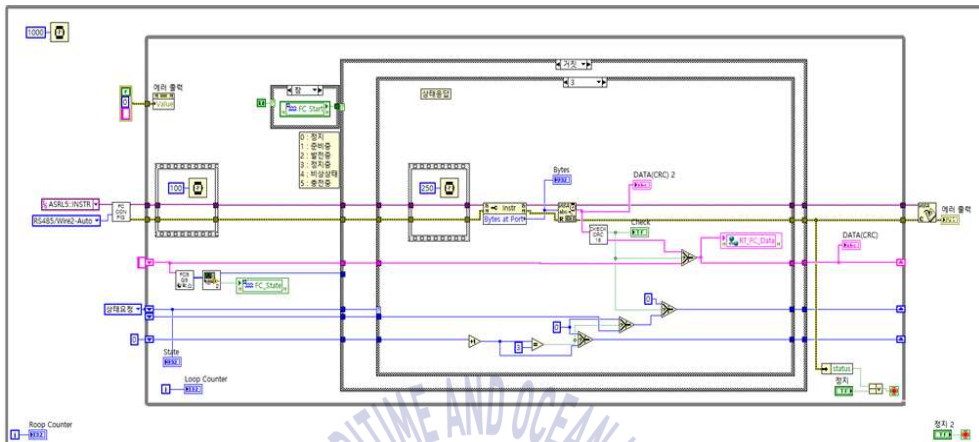


Fig. 3.19 Fuel cell communication program

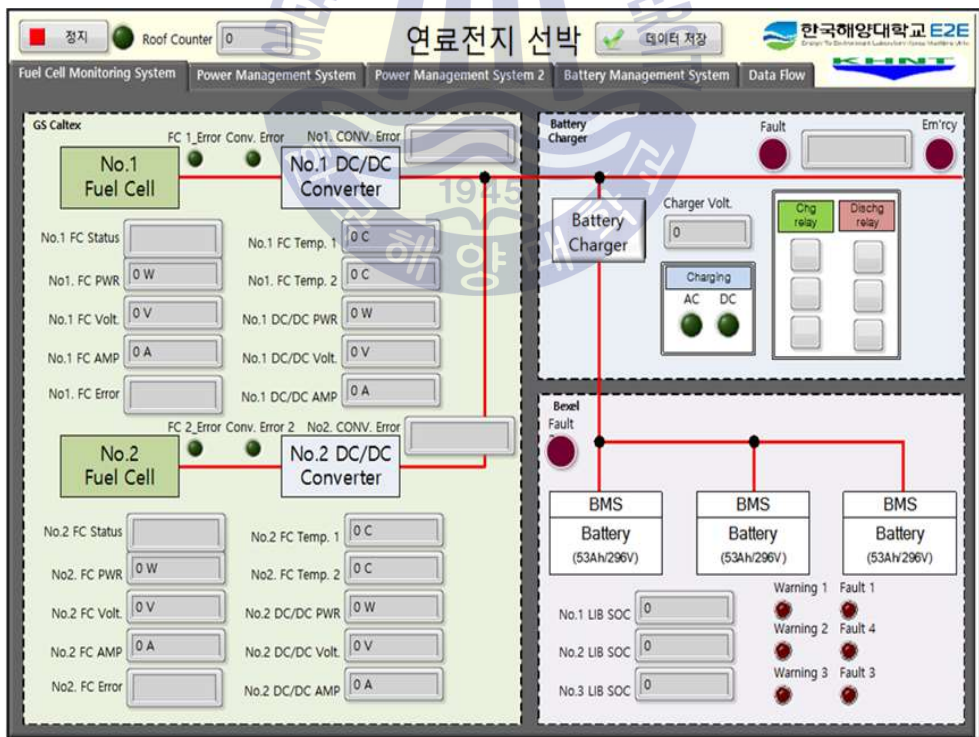


Fig. 3.20 GUI monitor for fuel cell

프로그램 구조는 상태머신(state machine)으로 짜여 있으며 BMS상태와 함께 연료전지의 상태 데이터를 요청하며, 통신으로 연료전지의 기동/정지 명령을 전달하도록 구성되어 있다. 잘못된 데이터 수신 확인을 위하여 데이터 프로토콜의 4[byte]는 CRC를 함께 송신함으로서 잘못된 데이터 수신확률을 0.1% 미만으로 되도록 하였다. 연료전지의 상태 데이터는 1초에 약 3번의 전체 데이터를 수신하며 잘못된 데이터 송신 시 이전에 받은 데이터를 사용자에게 보여주며 잘못된 데이터를 삭제하도록 구성하였다.

나) 배터리

연료전지 선박에 장착된 배터리는 갑작스런 선내 부하 증가나 추진 부하 증가에 따른 전력 보상을 위해 탑재하게 된다. 주된 이유는 연료전지의 전력 반응 및 응답속도가 배터리에 비하여 매우 느리며 빠른 전력 증가는 연료전지 수명 감소 및 소손의 주원인이 되기 때문이다.

설치되는 배터리는 총 3 팩(pack)으로 1 팩에 Li-ion 전지 80[cell]이 직결연결되어 있으며 1 팩 당 53[Ah]의 용량을 가진다. 1 팩 당 BMS가 하나씩 설치되어 있어 팩의 전압, SOC, 전류, 온도 등 상태를 확인하고 문제 발생 시 모션으로 가는 방전용 릴레이를 끊음으로서 배터리를 보호한다. 각 pack은 같은 ID를 가지는 CAN2.0B 통신을 사용함으로 중앙제어기와의 통신을 위해 3개의 통신 포트가 필요하게 된다. 초기 통신 정의 시 RS-485통신을 사용하기로 하였으나, CAN통신 사용 및 CAN통신이 같은 ID를 사용함에 따라 1개의 통신포트에서 3개의 통신포트가 증가하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하고자 여유분이 있는 RS-232통신을 이용하기 위해 CAN통신을 제어기 앞단에서 RS-232통신으로 변환하여 Fig. 3.21과 같이 수신하도록 구성하였다.

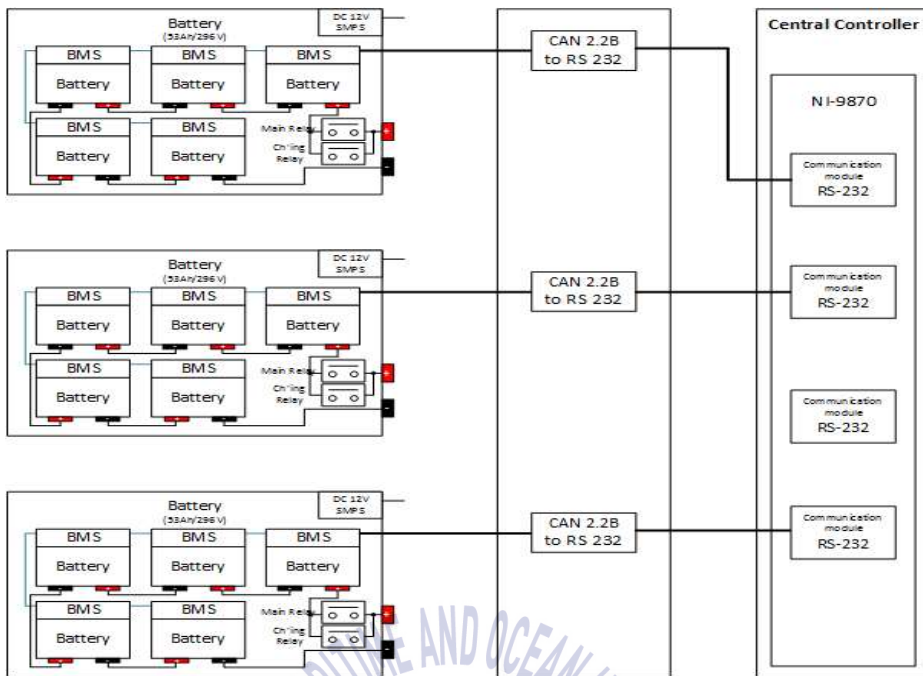


Fig. 3.21 Communication diagram for BMS

본 연구에서는 BMS에 리튬이온 배터리 1팩과 리튬 인산철 배터리 2팩을 이용한다. 이에 따라 제조사가 다른 BMS를 적용하므로 중앙제어기에서는 각 팩에 맞는 통신 프로그램을 각기 하나씩, 2개의 통신 프로그램 개발이 필요하게 되었다. 기존의 팩은 리튬이온 배터리로 구성되어있으며 예비용 배터리의 경우 리튬 인산철로 구성되어 있다. Table 3.7은 각 통신 프로토콜을 나타낸다.

Table 3.7 Communication protocol for BMS

CAN ID	Position	Data Type	Value	Comment
0x0011F4F4	Byte[0]	Uint8	0xF1	STX
	Byte[1]	Uint8	0x30	CMD
	Byte[2]	Uint8	1~4	MasterNumber
	Byte[3]	Uint8	1~16	SlaveNumber
	Byte[4]	Uint16		DataLength

	Byte[5]			
	Byte[6]	Uint16	Maximum battery cell voltage	bit per 0.001[V]
	Byte[7]		0~5.000[V]	
0x0012F4F4	Byte[0]	Uint16	Minimum battery cell voltage 0~5.000[V]	bit per 0.001[V]
	Byte[1]			
	Byte[2]	int16	Minimum battery cell Temperature -20.0[℃] ~ 100.0[℃]	bit per 0.1[℃]
	Byte[3]			
	Byte[4]			
	Byte[5]	Uint16	Bank total voltage 0 ~ 6000.0 [V]	bit per 0.1[V]
	Byte[6]			
	Byte[7]			
0x0013F4F4	Byte[0]	int16	Current value ex)-200.0[A] ~ 200.0[A]	bit per 0.1[A] Chg(+),Dchg(-)
	Byte[1]			
	Byte[2]	Uint8	SOC	bit per 1%
	Byte[3]		Status	
	Byte[4]		Warning Status	
	Byte[5]		Fault Status	
	Byte[6]		reserved	
	Byte[7]		0xF4	ETX
0x0001F4F4	Byte[0]	Uint8	0xF1	CMD
	Byte[1]		0x30	MasterNumber
	Byte[2]		1~4	SlaveNumber
	Byte[3]		1~16	DataLength
	Byte[4]	Uint16		
	Byte[5]			
	Byte[6]	Uint8	0x00	data
	Byte[7]		0xF4	ETX

Fig. 3.22는 리튬이온 배터리의 통신 프로토콜이다.

BMS Tx CAN Format											
CAN 2.0B, 500kbps, Little Endian											
Node	Destination	ID	XC2287M Msg Object	DLC	Cycle Time (ms)	Message Name	Fault	Start Byte	Start Bit	Bit Length	Valid Range
							SOC	0	0	16	0-100
							Used Count	2	16	16	0-65535
							Warning	4	32	1	0-1
							Fault	4	33	1	0-3
							Main + Relay	5	40	1	0-1
							Main - Relay	5	41	1	0-1
							PreCharge Relay	5	42	1	0-1
							Charge Relay	5	43	1	0-1
							Ignition	6	48	1	0-1
							Charger CAN In	6	49	1	0-1
							SubMode	7	56	4	16
							Mode	7	60	4	16
							P_Volt	0	0	16	0-10000
							P_Curr	2	16	16	-32768-32767
							Dc_LimitCurrent	4	32	16	0-10000
							C_LimitCurrent	6	48	16	0-10000
							Cell_Max_Volt	0	0	16	0-5000
							Cell_Min_Volt	2	16	16	0-5000
							Cell_Ave_Volt	4	32	16	0-5000
							Cell_Max_Temp	0	0	8	-50-125
							Cell_Min_Temp	1	8	8	-50-125
							Cell_Ave_Temp	2	16	8	-50-125
BMS	EXT	0x351	0	8	100	Summary					
BMS	EXT	0x352	1	8	100	PackValue					
BMS	EXT	0x353	2	8	100	Voltage					
BMS	EXT	0x354	3	8	100	Temperature					

Fig. 3.22 BMS CAN2.0B(500kbps) protocol for Li-ion battery

두 가지 배터리 모두 동일한 ID를 사용함에 따라 통신 데이터 수신을 위해서 3개의 통신 포트가 필요로 한다. 이에 따라 제어기 내 포트 수 확보를 위하여 동일하게 CAN통신을 RS232통신으로 변환하여 받으며, 두 배터리의 통신 프로토콜이 매우 상이하기 때문에 데이터 수신 및 패킷 분석을 위해 두 종류의 통신 프로그램을 작성하였다. Table 3.8은 배터리와 중앙제어기간에 신호를 나타낸다.

Table 3.8 Communication signal between battery and central console

Equip	Signal function	Signal name	Type	Connect to
Battery	No.1 pack SOC	SOC 1(KAE-50)	4~20[mA] current indicator	Central controller
	No.2 pack SOC	SOC 2(KAE-50)		
	No.3 pack SOC	SOC 2(KAE-50)		
	No.1 pack error	Error 1	Red LED	
	No.2 pack error	Error 2		
	No.3 pack error	Error 3		
	BMS 전원 On/Off	BMS On/Off	Toggle S.W	Console

BMS는 중앙제어기와 통신으로 모든 데이터를 송신하며, 중앙제어기는 사용자가 보다 편리하게 선박의 상태 및 배터리의 상태를 확인할 수 있도록 콘솔에 BMS로부터 받은 주요 데이터(SOC, error)를 표시한다. 다음 Fig. 3.23은 BMS 데이터 수집 프로그램을 나타내며 Fig. 3.24는 GUI기반의 monitoring 화면을 나타낸다.

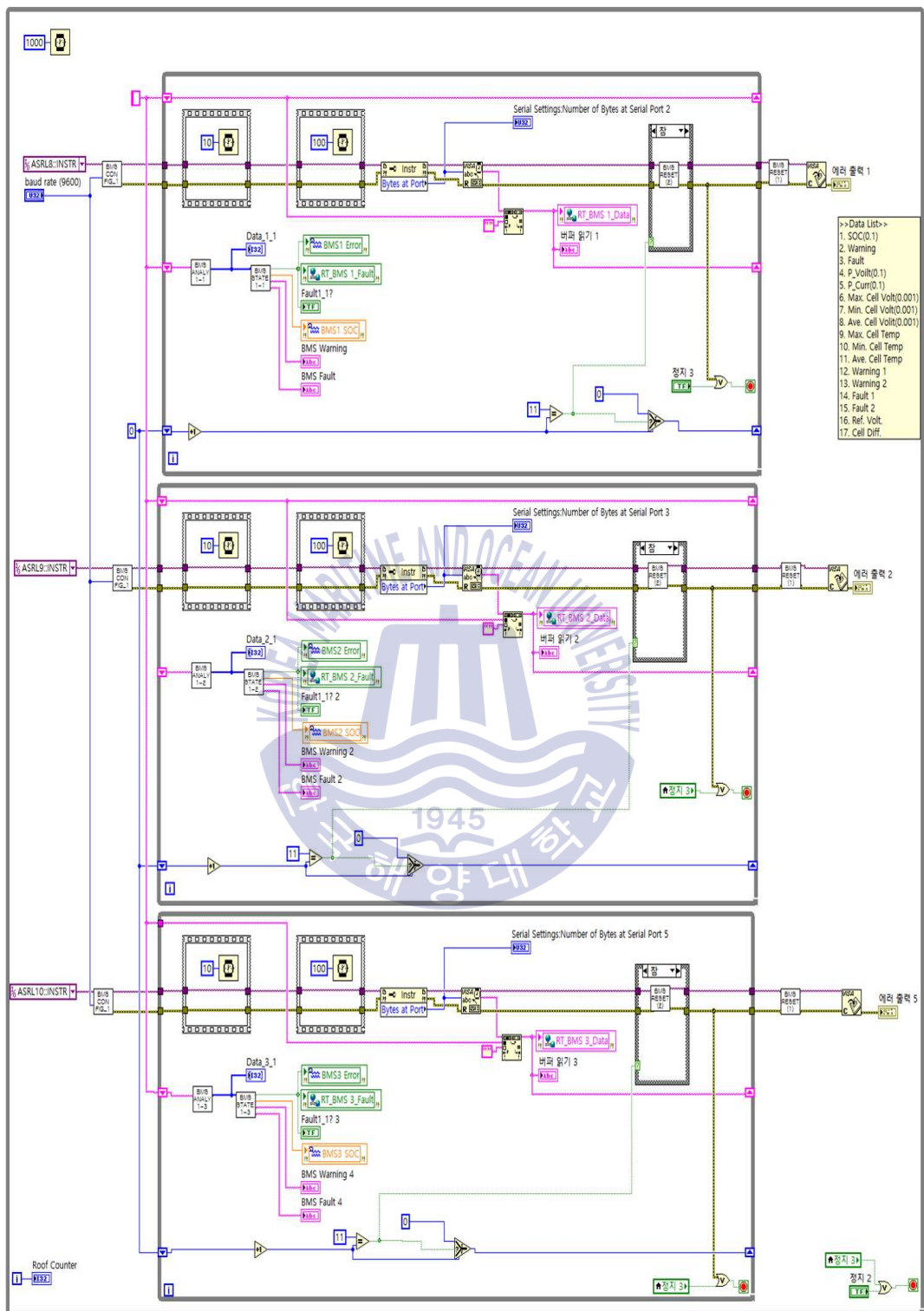


Fig. 3.23 BMS data communication program

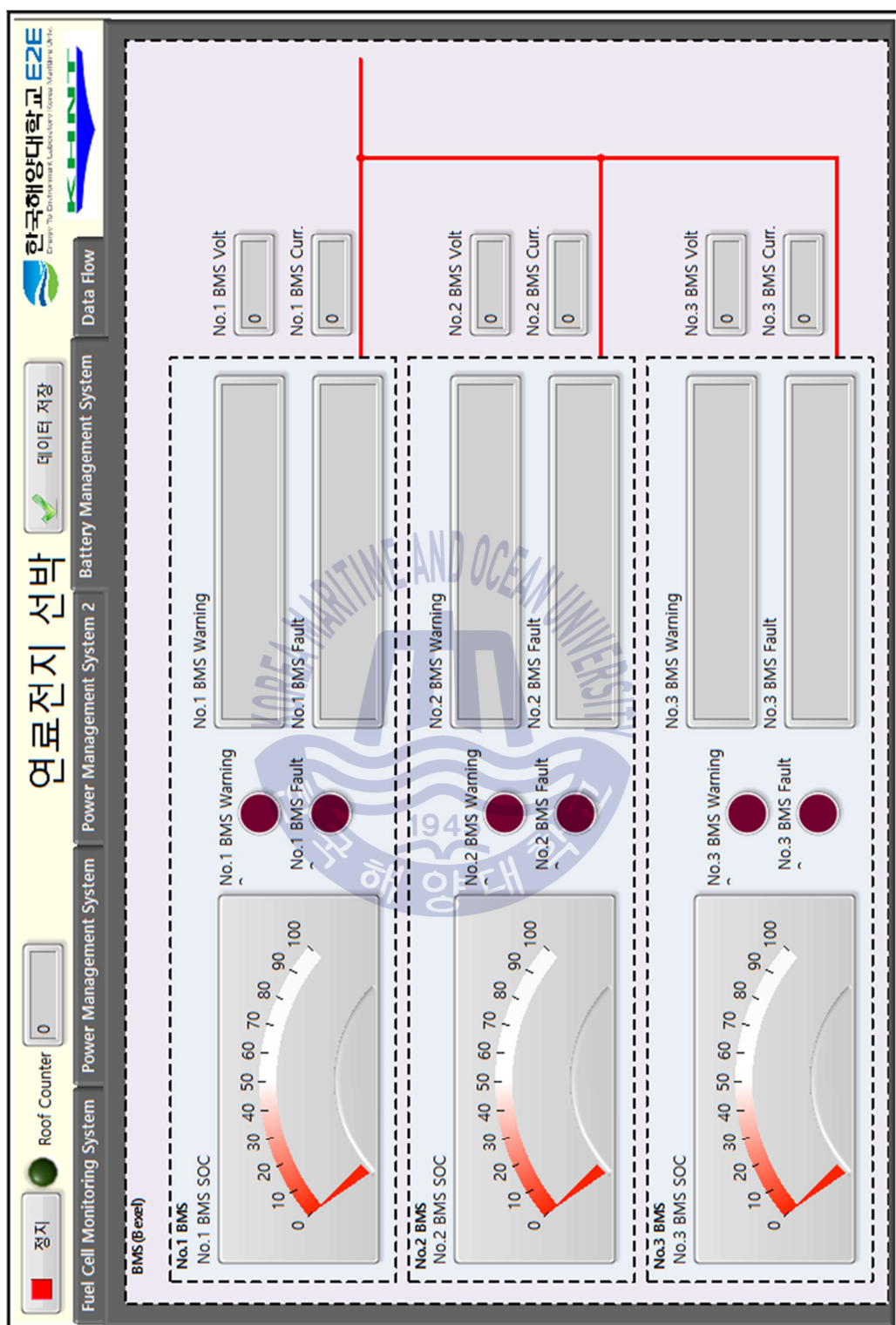


Fig. 3.24 GUI monitor for BMS

다) PMS

연료전지 선박은 UPS(Uninterrupted Power Supply), 추진용 배터리, 연료전지 등으로 선내 전력을 공급한다. 연료전지의 경우 갑작스런 전력부하 증가는 연료전지 수명 감소 및 연료전지 소손 등 많은 문제를 야기하게 된다. 반면 배터리는 순간 갑작스레 증가하는 부하에 강인한 대처가 가능하나, 갑작스런 부하 증가 및 감소상황에서 릴레이 소손이 발생할 수 있는 위험을 안고 있다. 이에 따라서 선내 갑작스런 부하 변동에 선내 주요 전력공급장치 계통의 소손을 방지하기 위해 PMS는 아래와 같은 동작을 수행한다.

- Cold ship상태에서 선박 운항 시 주요 부하로 순차적 전력 공급
- 부하 전력 공급 상태 확인
- 부하 원격제어
- 선박 운항 종료 시 부하 순차적 전력 공급 중단
- UPS 배터리 상태 확인

PMS는 원격으로 부하를 제어 가능하도록 구성되어 있으나, 비상상태를 대비하여 수동으로 모든 부하를 제어할 수 있도록 분전반 및 배전반을 설계하였다. 아래 Table 3.9은 PMS의 자동 및 수동 제어에 따른 필요 UPS 계통 신호를 나타낸다.

Table 3.9 PMS communication signal

Equip	Signal function	Signal name	Type	Connect to
PMS	UPS Auto S.W	Auto/Manual	Toggle S.W	Console
	UPS On/Off	UPS On/Off		
	UPS 220[VAC]	UPS 220[VAC]		
	UPS 24[VDC]	UPS 24[VDC]		
	DC/DC Converter	DC/DC Converter	4-20[mA] Currrent indicator	
	UPS SOC	UPS SOC		
	UPS Error	UPS Error		

PMS와 중앙제어기는 모든 데이터를 통신을 이용하여 송신 및 수신하며 수

동 제어를 위해선 콘솔 또는 분전반 및 배전반에 설치된 local 스위치 등을 이용하여 제어하도록 구성되어 있다. 중앙제어기와의 통신 연료전지 시스템과 동일하게 RS-485통신을 하며 주요 통신 설정 값은 연료전지 시스템과 동일하다. Fig. 3.25는 PMS의 통신 프로토콜을 나타낸다.

Response		Data			Description
Name	ACK	Parameter	Size(Byte)	Type	
RES001 (PMS Status request/response)	0x81	PMS Status	1	U08	[0000]=PMS OFF [0001]=PMS Idle (PMS Init) [0010]=Stand-by Mode (STBY) [0011]=Ready Mode (Key-1) [0100]=Starting (System-On Sequence : Key-2) [0101]=Normal mode (Status) [0110]=ShutDown (System-Off Sequence) [0111]=Halt Other = Reserved 0=Manual, 1=Auto
					Bit-4 : PMS/UPS Control Mode Bit(7:5) : Reserved -
		PMS Error Flag	1	U08	Bit-0 : PMS Error 0=OK, 1=Error (Main & Sub-PMS Communication Error) Bit-1 : UPS Error 0=OK, 1=Error (PMS-UPS Communication Error) Bit-2 : IAS Error 0=OK, 1=Error (PMS-Central Controller Communication Error) Bit-3 : MC Error 0=OK, 1=Error (Error on any MC) Bit(7:4) : Reserved -
					Bit(1:0) : UPS Control mode [00]=Standby mode [01]=Discharging mode [10]=Charging mode [11]=Reserved Bit-2 : UPS DC/DC State 0=Off, 1=On (DC Charger) Bit-3 : UPS AC220V State 0=Off, 1=On Bit-4 : UPS DC24V State 0=Off, 1=On Bit-5 : UPS DC12V State 0=Off, 1=On Bit-6 : UPS DC340V State 0=Off, 1=On Bit-7 : DC Charging State 0=Not-Full, 1=Full-Charged Bit-0 : UPS Low Power 0=OK, 1=Warning (by Low Battery) Bit-1 : UPS DC12V_24VError 0=OK, 1=Error Bit-2 : UPS DC/DC Error 0=OK, 1=Error Bit-3 : UPS DC/DC Error 0=OK, 1=Error Bit-4 : UPS DC/AC Error 0=OK, 1=Error Bit(7:5) : Reserved Bit-0 : DC M/C #1 State 0=Off, 1=On Bit-1 : DC M/C #2 State 0=Off, 1=On - Bit-81 : DC M/C #32 State 0=Off, 1=On Bit 0 : DC M/C #1 Error 0=OK, 1=Error Bit-1 : DC M/C #2 Error 0=OK, 1=Error - Bit-31 : DC M/C #32 Error 0=OK, 1=Error Bit-0 : AC M/C #1 State 0=Off, 1=On Bit-1 : AC M/C #2 State 0=Off, 1=On - Bit-7 : AC M/C #7 State 0=Off, 1=On Bit-0 : AC M/C #1 Error 0=OK, 1=Error Bit-1 : AC M/C #2 Error 0=OK, 1=Error - Bit-7 : AC M/C #7 Error 0=OK, 1=Error
		UPS Status	1	U08	
		UPS Error Flag	1	U08	
		DC MC State	4	U32	
		DC MC Error Info	4	U32	
		AC MC State	1	U08	
		AC MC Error Info	1	U08	
		UPS SOC_PER	1	U08	0 ~ 100(%) UPS SOC(%) Information
		UPS SOH_PER	1	U08	0 ~ 100(%) UPS SOH(%) Information
		UPS PACK_VOLT	2	U16	0 ~ 1000(V) UPS Battery Voltage (1V)
		UPS PACK_AMP	2	S16	-1000 ~ +1000(A) UPS Battery Current(1A)
RES002 (UPS Status request/response)	0x82	MODEL	8	Char	"String" UPS Model Information
		PRODUCT	20	Char	"String" UPS Product Information
		SYS_POWER	4	U32	UPS Power Information
		OP_MODE	2	U16	UPS Operating Mode
		SOC	2	U16	SOC
		SOH	2	U16	SOH
		PACK_TEMP	2	S16	-100 ~ +100 (°C) UPS Temp (1°C)
		PACK_POWER	4	S32	Pack Power (1W)
		PACK_VOLT	4	U32	Pack Voltage (10mV)
		PACK_AMP	4	S32	Pack Current (10mA)
		AC_OUT_VOLT	2	S16	UPS AC220V out V
		AC_OUT_AMP	2	U16	UPS AC220V out A
		DC_IN_VOLT	2	U16	UPS DC340V In V
		DC_IN_AMP	2	U16	UPS DC340V In A
		CUR_STATUS	2	U16	Present Operation Status Bits
		SET_STATUS	2	U16	Control Management Status Bits
		ERR_STATUS	2	U16	Error Check Bits
RES003	0x83	MC_No	1	U08	0x01(1d) ~ 0x28(40d) MC DC(1~32), AC(33~40) On
RES004	0x84	MC_No	1	U08	0x01(1d) ~ 0x28(40d) MC DC(1~32), AC(33~40) Off
RES005	0x85	UPS_Dev_No	1	U08	1=DC/DC Charger, 2=AC220V, 3=DC24V, 4=DC12V UPS Device On
RES006	0x86	UPS_Dev_No	1	U08	UPS Device Off
RES007	0x87	SW_No	1	U08	0x01(1d) ~ 0x10(16d) MC Group Switch On
RES008	0x88	SW_No	1	U08	0x01(1d) ~ 0x10(16d) MC Group Switch Off

Fig. 3.25 Communication protocol for PMS

정기보하표(연료전지선박)

Ver : V3
Date : 2014-08-13

계통	용량	사양			운행 모드별 평균 부하 전력(W)												비고			
		전력(W)	수량	합계(W)	항해			계류			정박			비상						
주전 계통	주전제어기	DC24V	400	1	400	1.00	-	400	-	1.00	-	400	-	1.00	-	400	-	-	-	
		정기부하 전계	AC220V	200	1	200	1.00	200	-	-	1.00	200	-	-	1.00	200	-	-	-	
		반동부(시동기/리튬)	DC24V	1500	1	1500	1.00	-	1500	-	1.00	-	1500	-	1.00	-	1500	-	-	
		BMS	AC220V	1500	1	1500	1.00	1500	-	-	1.00	1500	-	-	1.00	1500	-	-	-	
		수소 충전통	DC24V	6600	1	6600	1.00	6600	-	-	1.00	6600	-	-	1.00	6600	-	-	-	
		수소탱크 제어기(PIC, 수소부스터)	DC24V	1200	1	1200	1.00	1200	-	-	1.00	1200	-	-	1.00	1200	-	-	-	
		PMS 제어기	DC24V	1000	1	1000	1.00	1000	-	-	1.00	1000	-	-	1.00	1000	-	-	-	
		Water-Mat 보양 제어기(보양용, 보양제, 수소부)	DC24V	12000	1	12000	0.01	-	12000	-	0.01	-	12000	-	0.01	-	12000	-	-	-
		Water-Mat 제어기(보양용, 보양제, 수소부)	DC12V	6.0	2	12.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	
		Water-Mat 제어기(보양용, 보양제, 수소부)	DC12V	6.0	2	12.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	
조명 계통	조명 제어기	DC12V	100	2	200	0.50	-	-	100	1.00	-	-	200	0.01	-	0.02	0.00	-	-	
		조명 제어기	DC12V	8.0	2	16.0	0.01	-	-	8.0	0.01	-	-	16.0	0.01	-	0.02	0.01	-	-
		조명 제어기	DC12V	6.0	10	60.0	1.00	-	-	60.0	0.00	-	-	60.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		조명 제어기	DC12V	100	2	200	0.50	-	-	100	0.50	-	-	200	0.01	-	0.02	0.00	-	-
		조명 제어기	DC12V	100	2	200	0.50	-	-	100	0.50	-	-	200	0.01	-	0.02	0.00	-	-
		조명 제어기	DC12V	100	2	200	0.50	-	-	100	0.50	-	-	200	0.01	-	0.02	0.00	-	-
		조명 제어기	DC12V	100	1	100	0.10	-	-	100	0.10	-	-	100	0.01	-	0.02	0.01	-	-
		조명 제어기	DC12V	100	1	100	0.10	-	-	100	0.10	-	-	100	0.01	-	0.02	0.01	-	-
		조명 제어기	DC12V	100	1	100	0.10	-	-	100	0.10	-	-	100	0.01	-	0.02	0.01	-	-
		조명 제어기	DC12V	100	1	100	0.10	-	-	100	0.10	-	-	100	0.01	-	0.02	0.01	-	-
보조기기 계통	보조기기 제어기	DC12V	8.4	1	8.4	1.00	-	-	8.4	1.00	-	-	8.4	0.00	-	0.00	0.00	-	-	
		보조기기 제어기	DC12V	8.4	2	16.8	1.00	-	-	16.8	1.00	-	-	16.8	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC12V	8.4	1	8.4	1.00	-	-	8.4	1.00	-	-	8.4	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC24V	1680	1	1680	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC12V	10.0	1	10.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC24V	0.0	2	0.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC12V	113.8	0.0	0.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC12V	113.8	0.0	0.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC12V	113.8	0.0	0.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		보조기기 제어기	DC12V	113.8	0.0	0.0	0.00	-	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-
항해 계통	항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-	
		항해 제어기	DC24V	55.2	4	220.8	1.00	-	-	220.8	1.00	-	-	22.2	0.01	-	0.01	0.01	-	-
		항해 제어기	DC24V	24.0	4	96.0	1.00	-	-	96.0	1.00	-	-	1.0	0.01	-	0.01	0.01	-	-
		항해 제어기	DC12V	144.0	1	144.0	1.00	-	-	144.0	1.00	-	-	14.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC12V	72.0	2	144.0	1.00	-	-	144.0	1.00	-	-	7.8	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC12V	78.0	1	78.0	1.00	-	-	78.0	1.00	-	-	7.8	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC12V	78.0	2	156.0	1.00	-	-	156.0	1.00	-	-	15.6	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC12V	81.6	2	163.2	1.00	-	-	163.2	1.00	-	-	16.32	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC12V	158.4	2	316.8	1.00	-	-	316.8	1.00	-	-	31.68	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC12V	158.4	2	316.8	1.00	-	-	316.8	1.00	-	-	31.68	0.00	-	0.00	0.00	-	-
항해 계통	항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-	
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-
		항해 제어기	DC24V	25.0	1	25.0	1.00	-	-	25.0	1.00	-	-	25.0	0.00	-	0.00	0.00	-	-

Fig. 3.26 Load analysis of ship(1)

<UPS 사양 및 용량 계산표>														
1. UPS 출력 사양														
출력 사양	구분	비율 (%)	출력			비고								
			AC220V	DC24V	DC12V									
			2,000	2,000	2,000									
			1,240	889	1,183									
			1,459	1,046	1,391									
최대 전력 + Margin			85.0%											
UPS 최대 출력 (사양)				1,800	3,500	2,200	(* 결정 필요 사항)							
2. UPS Battery 용량 계산														
공급 전력	구분	비율 (%)	용량 (Wh)			비고								
			Battery 용량 (Wh)	10,000										
			Battery 가용율 (SOC)	90.0%	(1,000)									
			전력 변환 효율 (Loss 포함)	80.0%	(2,000)									
			가용 전력 (Wh)		7,200									
3. UPS 사용 예상 시간 (만충전시, 무충전 기준)														
소비 전력	구분	항해		계류		정박		비상		합계		예상 사용 시간 (만충전 기준)		
		비율 (%)	전력(W)	비율 (%)	전력(W)	비율 (%)	전력(W)	비율 (%)	전력(W)	비율 (%)	전력(W)			
		-	3,049	-	2,137	-	1,628	-	1,117					
		Case-1	75.0%	2,286	5.0%	107	20.0%	326	0.0%	0	100.0%		2,719	2.6 Hr
		Case-2	50.0%	1,524	25.0%	534	25.0%	407	0.0%	0	100.0%		2,465	2.9 Hr
Case-3	50.0%	1,524	10.0%	214	40.0%	651	0.0%	0	100.0%	2,389	3.0 Hr			
Case-4	90.0%	2,744	5.0%	107	5.0%	81	0.0%	0	100.0%	2,932	2.5 Hr			
비상 운항 모드		0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	100.0%	1,117	100.0%	1,117	6.4 Hr		

Fig. 3.28 UPS capacity calculation based on ship load analysis

Table 3.9의 PMS 프로토콜과 같이 PMS는 선내 UPS 정보 및 선내 전력 상태를 중앙제어기에 보내게 된다. 중앙제어기에서는 콘솔에 있는 스위치를 사용하여 선내 부하를 on/off신호로 PMS에 전달하게 되고 PMS 전달 받은 부하 동작 상태를 분전반 및 배전반을 통하여 부하 전원제어를 하게 된다. 부하 제어 포인트 개수 및 중요도를 확인하고 선내 필요한 전력을 계산하기 위해 아래와 같이 선내 전체 전력 부하 분석을 진행하였다.

연료전지 선박 시나리오

PMS RJ45 4번 : 485+
PMS RJ45 5번 : 485-

2015.04.16

시동 전 준비사항

Cold Ship : UPS 전원 On(Toggle) -> UPS 기동 On(Push button) -> Key S.W 운영

충전 후 : DC/AC Select S.W N.C 이동(3-State S.W) -> Charging S.W N.C 이동(3-State S.W) -> BMS Off(Toggle) -> Key S.W 운영

운영자 수동 조작

운영자 수동 조작

S.W 명	From	Via	To	기 능	비 고
Key S.W 1단 On	Console	-	PMS	UPS 220V On -> UPS 24V On -> UPS 12V On -> 충전 제어기 On	
Key S.W 2단 On	Console	-	PMS	FAN On -> 추진제어기 On -> Console 전원 On, 팬넬 PC On -> BMS 제어기 On -> 수소제어기 On -> 수소밸브 -> FAN Off	Fan 가동 1분 후 수소제어기 On (정박중 누설된 수소로 인한 Vant 방지)

운항 전 준비사항

Discharging S.W On(3-State S.W) -> BMS On(Toggle) -> FC 전원인가(Toggle) -> H.T V/V Open(Push) -> F.C 기동 On(Push)

운영자 수동 조작

(주후 수질 점검)

Console S.W명	From	Via	To	기 능	비 고(15번 제외 Push Button)
1 Panel P.C On	Console	-	IAS	Panel P.C On	PMS 기능과 무관
2 항해/정박	Console	IAS	PMS	선박 자동식별장치 -> 레이더 장치 -> GPS -> 컴파스 -> VHF전화기 -> Inverter	Off시 역순 진행(Off 명령)
3 FC to UPS Charge	Console	IAS	PMS	FC to UPS Charging Relay On / Off	Off시 역순 진행(Off 명령)
4 화장실	Console	IAS	PMS	LED 등(화장실, 워터렛, UPS, Void), 진공펌프, 출입펌프, 청수펌프	Off시 역순 진행(Off 명령)
5 발지펌프	Console	IAS	PMS	발지펌프	Off시 역순 진행(Off 명령)
6 FAN	Console	IAS	PMS	FAN-Flagemount, FAN-Flexmount	Off시 역순 진행(Off 명령)
7 정박등	Console	IAS	PMS	정박등	Off시 역순 진행(Off 명령)
8 항해등	Console	IAS	PMS	항해등(상등, 양색등, 선미등)	Off시 역순 진행(Off 명령)
9 실내등	Console	IAS	PMS	실링라이트(조타실), 실링라이트(승객실)	Off시 역순 진행(Off 명령)
10 브릿지뒤조명	Console	IAS	PMS	브릿지 뒷면 조명	Off시 역순 진행(Off 명령)
11 선내지령장치	Console	IAS	PMS	선내 지령장치	Off시 역순 진행(Off 명령)
12 CCTV, 선내편의시설	Console	IAS	PMS	CCTV -> 선내편의시설 전원	Off시 역순 진행(Off 명령)
13 납축배터리	Console	IAS	PMS	납축 배터리	
14 연료전지 Heater	Console	IAS	PMS	연료전지 히터	
15 UPS 전원	Console	-	UPS	Console 전원(주후 Cover 예정)	Toggle
16 UPS 기동	Console	-	UPS	Console 기동 Trigger 신호	

항해, 정박 Mode에 따른 항해등, 정박등 On/Off의 제어의 어려움(아래 항해, 정박등과 중복) 및 밝은날의 전력 손실 최소화를 위해 별도로 나누었음.

운항 종료 준비사항

Key S.W 종료 전 : H.T V/V Close(Push) -> F.C Off(Push) -> BMS Off(Toggle)

운영자 수동 조작

S.W 명	From	Via	To	기 능	비 고
Key S.W 2단 Off	Console	-	PMS	충전제어기(220V), BMS 제어기(220V)를 제외한 장비 Off, UPS 24V, 12V Off	육전 충전시 Key S.W 1단 상태에 놔둠
Key S.W 1단 Off	Console	-	PMS	UPS Converter를 포함한 모든 장비 Off	Fan 가동 1분 후 수소제어기 On (정박중 누설된 수소로 인한 Vant 방지)

운항 종료 후 충전 진행사항

Key S.W 1단 후 : 육전 연결 -> AC 충전 선택(3-State S.W) -> Charging Select(3-State S.W) -> BMS On(Toggle)

운영자 수동 조작

운항 중(충진 및 해상) 충전 진행사항

UPS 충전 및 Bessel 동시 충전은 전력 부족현상 발생이 예상되므로 FC to UPS 충전 Off

UPS 충전 Off -> 추진 속력 감속 -> BMS Off(Toggle) -> Charger Setting(DC 충전, 방전 중일 시 충전 Mode로 전환) -> BMS On

운영자 수동 조작

운영자 수동 조작

Fig. 3.29 Operating procedure for fuel cell ship

Fig. 3.26 및 3.27와 선내 부하 분석을 기준으로 Fig. 3.28의 UPS 용량을 선정하였으며 선박을 가능한 장시간 동안 운항하기 위해 선내 전력 사용 최적화를 위해 선박 운항 시나리오를 바탕으로 부하 제어 방법을 구축하였다. 선박 운항 시나리오는 선내 전력을 필수부하와 비 필수부하, 중요부하와 비 중요부하 등으로 구분하여 최소 전력으로 선박을 운항 할 수 있도록 구성하였으며 운전자가 보다 편리하게 선박운항이 가능하도록 원 버튼 제어 방식을 적용하였다. Fig. 3.29는 연료전지 선박 운항 시나리오를 나타내며, Fig. 3.30은 PMS의 GUI기반 monitoring 화면을 나타낸다.

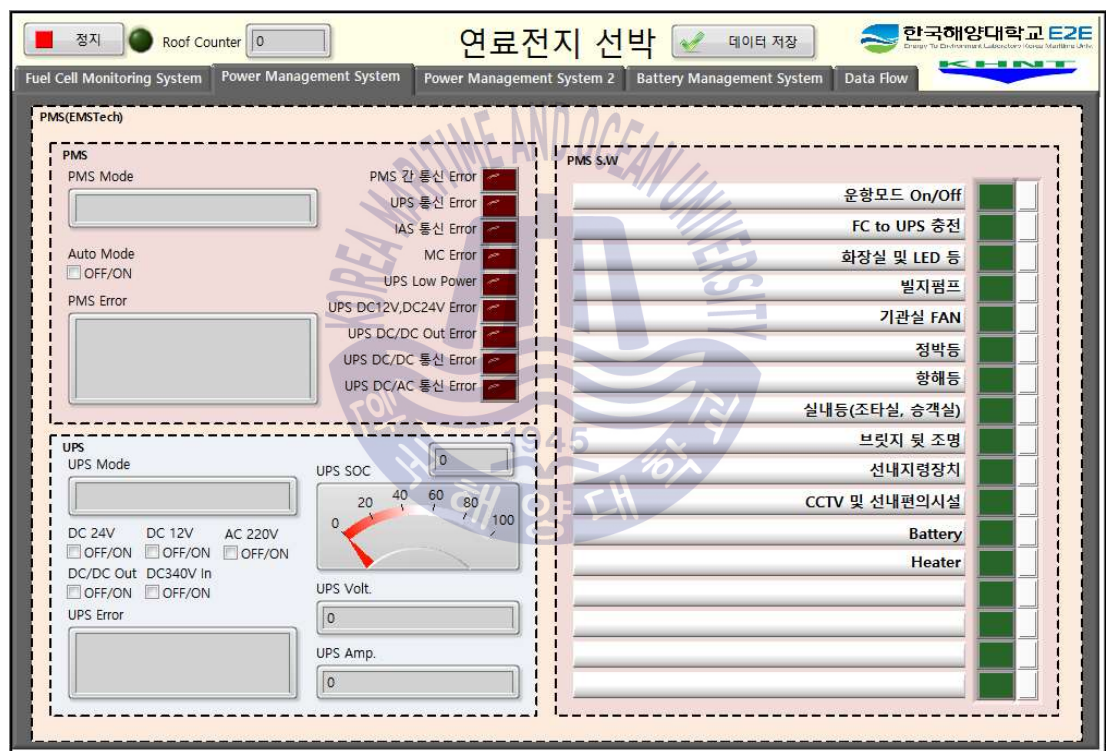


Fig. 3.30 GUI monitor for PMS

라) 추진 신호 제어 시스템

연료전지의 특성으로 인해 추진전력의 급격한 변화는 연료전지 시스템에 좋지 못한 영향을 미치게 된다. 연료전지 종류 및 용량에 따라 변화 가능한 전류 허용치는 정하여져 있으므로 선박 추진 시 연료전지가 허용 가능한 전류 변화 허용치 안에서 추진전력을 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 만약의 사태에 대비하기 위해 연료전지 출력 전력이 추진 전력 변화에 느리게 반응한다 하더라도 선박에 설치되어 있는 배터리가 부족한 전력분에 대하여 강인하게 대처 가능하도록 구성되어 있다.

연료전지와 배터리가 연계된 하이브리드 시스템이라 하더라도 보다 안정적인 선박 운항과 연료전지 수명 향상을 위하여 일반적으로 급작스런 추진 전력 증가를 사전에 대비해야 한다. 이와 같은 이유로 중앙제어기는 콘솔에서부터 내려오는 텔레그래프 지령치를 받아 연료전지가 허용 가능한 전류 범위 안에서 작동할 수 있도록 신호를 수정, 보완하여 추진 시스템에 전달하게 된다. 즉, 텔레그래프 신호를 중앙제어기에서 받아 사용자 제어 신호 목표 값까지 도달하는 동안 연료전지 특성에 맞춰 단계적으로 추진시스템에 신호를 전달하게 된다.

텔레그래프는 선박의 좌현과 우현에 하나씩 설치되어 있으며 가변 저항형태로 5[VDC] 입력을 받아 제어기에 1~4[V] 전압 출력 값이 전달된다. 전압 신호는 신호선이 길어지게 되면 전압강화가 발생하며, 높은 전류흐름에 많은 노이즈를 받게 되므로 추진 시스템인 모터 인버터에 입력되는 신호는 전압 신호를 콘솔에 위치하고 있는 중앙제어기에서 받아 전류신호로 변환하여 모터 인버터에 전달하게 된다. 전달하는 과정에서 중앙제어기는 전압신호를 단계적으로 전류신호로 변환하여 모터 인버터에 전달한다. Fig. 3.31과 같이 요청전력이 급격히 증가하더라도 연료전지에서 감당 가능한 추진전력만 인버터에 전달함으로써 제어 반응이 다소 느리더라도 안정적으로 운항이 가능하도록 구성하였다.

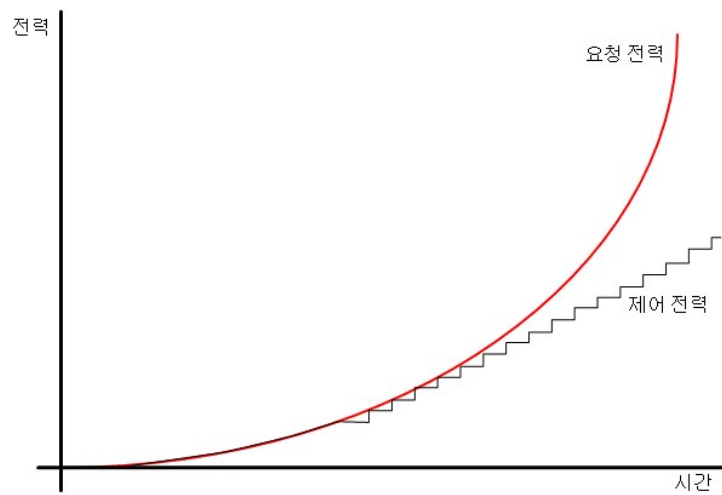


Fig. 3.31 Power control of propulsion system

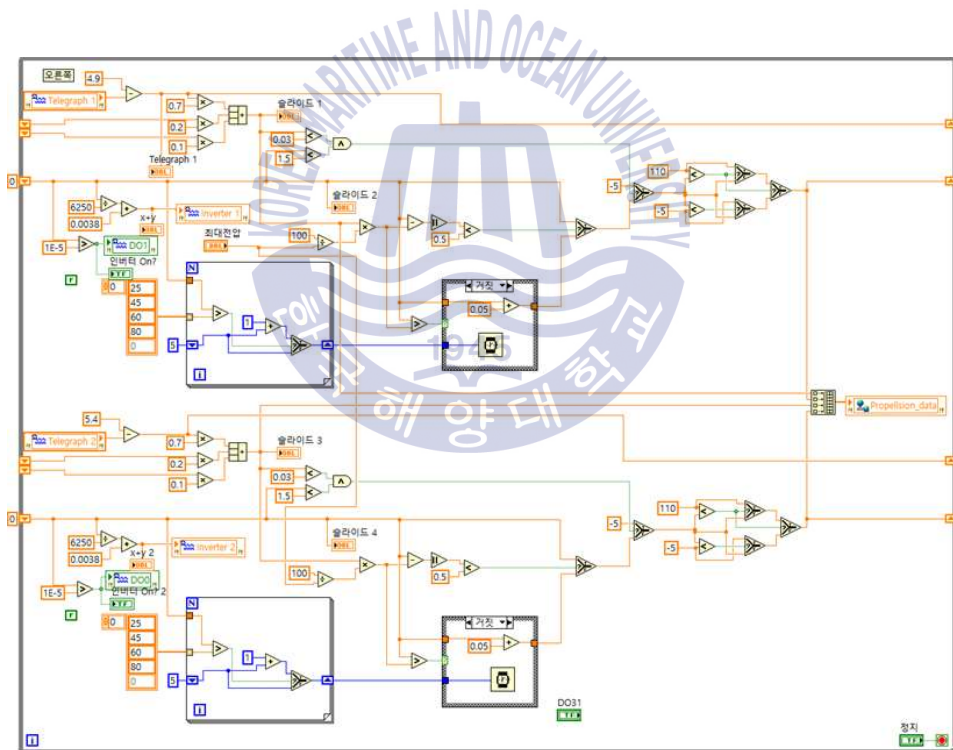


Fig. 3.32 Control diagram of propulsion system

모터의 출력 특성상 저 부하에서의 전력 증가율은 고 부하에서의 전력 증가율과 큰 차이가 발생한다. 저 부하에서의 모터 회전수 증가는 전력 변화에 큰 변화가 발생하지 않지만 고 부하에서의 모터 회전수 증가는 증가된 회전수분에 비하여 매우 큰 전력을 소모하게 된다. 이에 따라 추진 시스템 제어 프로그램은 Fig. 3.32와 같이 저 부하에서는 사용자 목표 신호 값까지 빠른 속도로 추정하도록 되어 있으나, 고 부하에서 사용자 목표 값까지 도달하는데 신호 증가 속도를 저 부하에 비하여 매우 느리도록 구성을 하였다.

배터리와 연계된 연료전지 시스템에서 추진부하 증가 속도를 조금씩 증가시키며 감당 가능한 최적 점을 찾아 선박에 적용함으로써 사용자가 원하는 선박 속도까지 최대한 빠르게 추종 가능하도록 하였으며 완성된 시제 선박 운항 결과 연료전지 및 배터리의 shut down없이 추진 부하를 안정적으로 감당하는 것을 확인하였다.

선박의 추진시스템 부하 증가와는 반대의 경우 즉, 부하 감소 시에는 사용자 신호를 즉시 반영하여 추진시스템에 적용 할 수 있도록 하였다. 이유는 선박 운항 중 전방에 장애물이 있어 선박의 안전을 위해 급격한 정지가 필요한 경우가 있다. 따라서 사용자가 추진 부하를 감소시켰을 시 즉시 중앙제어기는 인버터로 전달되는 추진 신호를 끊음으로써 빠른 시간 내에 선박이 멈출 수 있도록 해야 한다. 급격한 부하 감소는 부하 증가와 달리 연료전지 내 화학반응 중단으로 연료(에너지) 손실 없이 안정적으로 대응 가능하며 배터리의 경우도 동일하게 무리 없이 전력 공급을 중단할 수 있기 때문이다.

제 4 장 연료전지 선박 전력시스템 시뮬레이션

4.1 연료전지 시뮬레이션

연료전지의 전기적 특성은 Fig. 4.1의 활성화 분극 곡선과 같이 전류가 증가함에 따라서 전압이 감소한다. 이 분극 곡선 I-V 특성은 공급되는 연료, 공기의 양, 압력, 동작 온도 등의 여러 환경 변수에 의해 변화한다.

개회로 상태에서의 연료전지 전위는 이론 전위와 같거나 이에 가까울 것으로 예상할 수 있는데, 사실은 이론 전위값을 내지 못한다. 이는 연료전지에서 외부 전류가 발생하지 않더라도 손실이 생김을 의미하는데 이러한 전압 손실 요인은 전기화학 반응 속도, 내부 전기 저항과 이온 저항, 반응물이 반응 부위에 도달하는 용이도, 내부전류, 반응물의 크로스오버가 있다. 위와 같은 손실로 인해 Fig. 4.1의 실제 분극 곡선의 형태로 I-V 특성이 나타나게 된다.

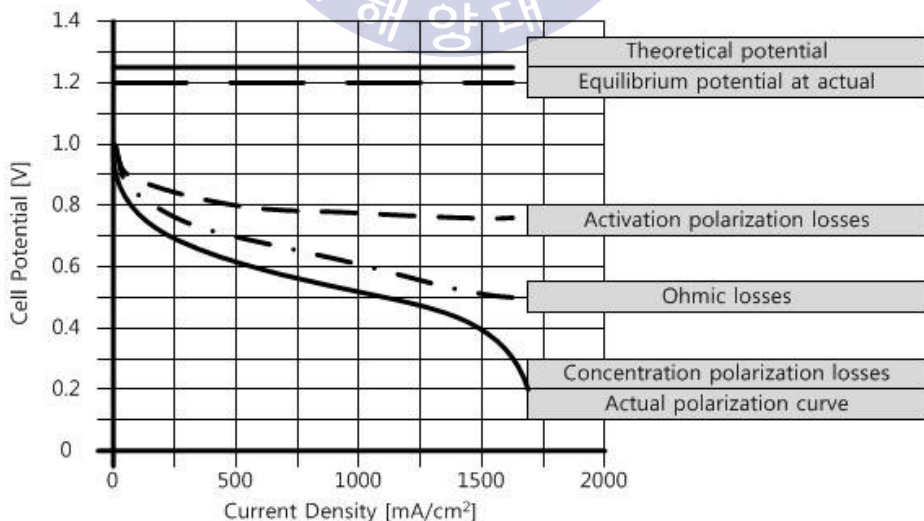


Fig. 4.1 Polarization curve of fuel cell

연료전지를 시뮬레이션하기 위해서는 분극 곡선을 모델링한다. 연료전지는 전기를 생성하는데 모든 에너지가 전기로 변환되는 것은 아니다. 화학 반응에서는 다소의 엔트로피가 생성되기 때문에 수소의 고발열량 일부는 전기로 변환되지 못한다. 연료전지에서 반응 엔탈피가 전기로 변환될 수 있는 양은 Gibbs 자유 에너지에 해당하며, 식 4.1로 나타낼 수 있다.

$$\Delta G = \Delta H - T_f \Delta S \quad (4.1)$$

Gibbs 자유 에너지를 이용하여 온도와 압력 함수의 이상적 전지 전위를 나타내면 다음 식 4.2와 같다.

$$E_{T,P} = - \left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T_f \Delta S}{nF} \right) + \frac{RT_f}{nF} \ln \left[\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (4.2)$$

여기서 F 는 Faraday 상수로 96,485 [C/mol]이며, R 은 기체 상수로 8,314 [J/molK]이다. 100[°C]미만에서는 온도에 ΔH 와 ΔS 의 오차가 아주 적기 때문에 이 값은 무시하고, 반응물은 대기압 상태의 기체, 생성물은 물인 경우로 하여 식 4.2를 계산하면 식 4.3과 같다.

$$E_{T,P} = 1.482 - 0.000845 \times T_f + 0.0000431 \times T_f \times \ln(1 \times 0.21^{0.5}) \quad (4.3)$$

식 4.3에서 구한 연료전지의 이론 전위에서 Fig. 4.1에서 확인할 수 있는 활성화 분극 손실, 저항 손실, 농도 분극 손실을 반영하여 실제 분극화 곡선으로 나타낼 수 있는데 이는 식 4.4로 표현할 수 있다.

$$E_{fc} = E_{T,P} - \frac{RT_f}{\alpha F} \ln\left(\frac{i_f + i_{lo}}{i_c}\right) - \frac{RT_f}{nF} \ln\left(\frac{i_L}{i_L - i_f}\right) - i_f R_i \quad (4.4)$$

식 4.4에서 2항은 활성화 분극 손실, 3항은 농도 분극손실, 4항은 저항 손실을 나타낸다.

교환전류밀도 i_c 는 전기화학 반응을 진행시키기 위한 전극의 준비상태의 척도로 이 값이 크면 전극 표면이 활성화적으로 되는데 이는 전하가 전해질로부터 전극 표면으로 또는 그 반대로 이동하면서 극복해야하는 에너지 장벽이 낮아지기 때문이다. 그래서 교환전류밀도가 클수록 과전위에 관계없이 더 많은 전류가 발생된다. 이 교환전류밀도는 반응물의 농도와 동작 온도, 작동 기체의 분압에 따라서 변화하게 되는데 이는 식 (4.5)로 나타낼 수 있다. 여기서 기준압력 P_{ref} 는 대기압, 기준온도 T_{ref} 는 25°C (298.15[K])이다.

$$i_c = i_{ref} a_c L_c \left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^\gamma \exp\left[-\frac{E_c}{RT}\left(1 - \frac{T_f}{T_{ref}}\right)\right] \quad (4.5)$$

식 4.4의 연료전지 분극 곡선식으로써 NI사의 LabVIEW를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 연료전지의 특성을 파악하기 위하여 분극 곡선에 영향을 주는 동작온도, 동작 기체(반응물)의 분압, 한계전류밀도 등을 변수를 주고 GUI(Graphic User Interface)를 통해 이를 사용자가 확인할 수 있도록 프로그래밍을 하였다,

4.1.1 활성화 손실

연료전지에서 생성되는 전류는 전극반응이 진행됨에 따라 흐르는 전류는 산화방향전류(부분 양극전류)와 환원방향전류(부분 음극전류)의 합으로 표현된다. 전극반응이 동적인 평형상태일 경우에는 부분 양극전류와 부분 음극전류의 절대값이 같아지는데 이것을 교환전류라 하고, 전극의 단위면적(겉보기 표면적)당의 교환전류를 교환전류밀도라 한다. 이러한 교환전류밀도는 전극반응을 해석하는데 있어 매우 중요한 파라미터이다. 전극 반응에 관여하는 화학종이 모두 표준상태에 있을 경우의 교환전류밀도를 표준교환전류밀도라 한다. 이러한 교환전류 밀도는 여러 가지 전기화학 완화법을 사용하여 측정할 수 있다.

즉, 교환전류밀도는 화학반응 진행에 대한 전극의 준비성으로 이해할 수 있으며 전기 화학적 반응에 대한 속도상수(온도, 촉매 양, 촉매)등에 영향을 받는다. 교환전류 밀도는 Butler-Volmer의 식을 이용하여 식 (4.6)으로 나타낼 수 있다.

$$i = i_o \exp\left(\frac{\alpha n F v_{act}}{RT}\right) - i_o \left(\frac{-(1-\alpha)n F v_{act}}{RT}\right) \quad (4.6)$$

여기서 i 는 단위 촉매 표면적 당 전류밀도[A/cm²]이며 i_o 는 단위 촉매 표면적[A/cm²] 당 교환전류 밀도, v_{act} 는 활성화 분극화[V], n 은 반응 당 이동한 전자 수, R 은 기체상수, 그리고 T 는 온도이다. 전달 계수는 연료전지에 대한 반응속도의 변화를 유발하는 분극화의 변화로서 0.5로 가정하였다. 전달 계수[α]를 0.5로 가정하였을 시 교환전류밀도로 인한 전압손실은 식 (4.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i = 2i_o \sinh\left(\frac{n F v_{act}}{2RT}\right) \quad (4.7)$$

식 (4.6)의 Butler-Volmer 식에 근거하는 활성 분극화를 얻기 위해 v_{act} 가 구하여지도록 식을 (4.8)과 같이 변경할 수 있다.

$$V_{act} = \frac{2RT}{nF} \sinh^{-1} \left[\frac{i}{i_0} \right]_{(\alpha=0.5)} \quad (4.7)$$

따라서 활성 분극화는 낮은 전류밀도에서 더 빠르게 증가하고 높은 전류밀도에서는 더 느리게 증가할 것으로 볼 수 있다. Fig. 4.2는 활성화 손실에 대한 교환전류밀도의 영향을 나타내며, Fig. 4.3은 활성화 손실에 대한 전달계수의 영향에 대하여 나타낸다.

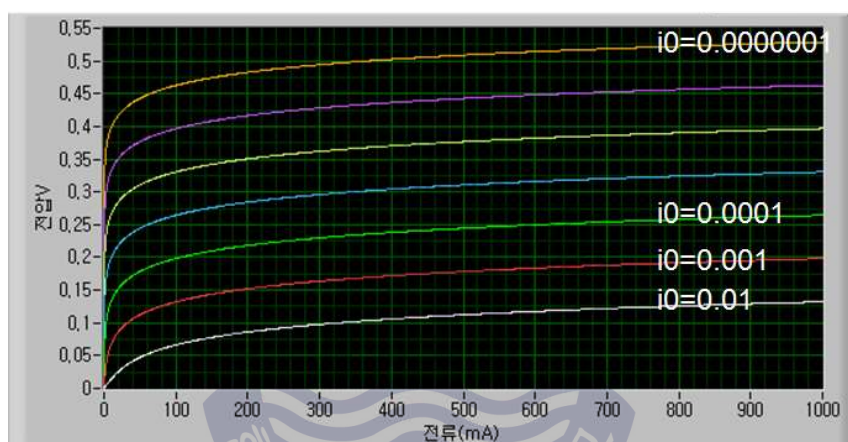


Fig. 4.2 Activation loss for effect of exchange current density

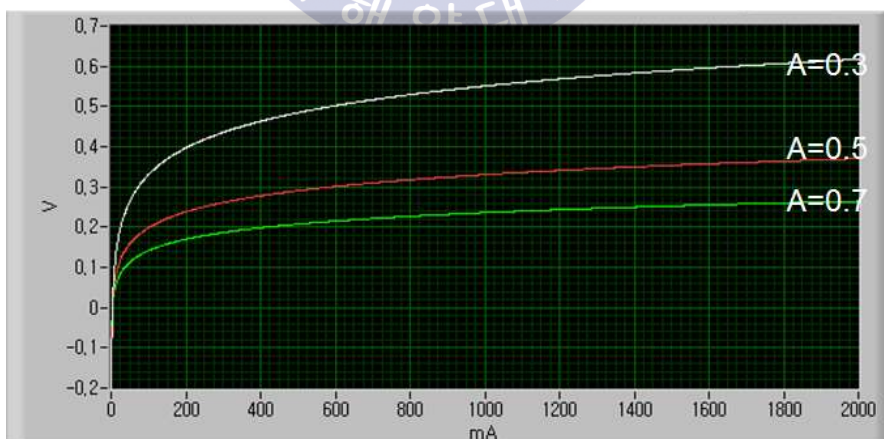


Fig. 4.3 Activation loss for effect of transfer coefficient

4.1.2 농도손실

연료전지 내부 촉매 층에서 반응물과 생성물의 고갈과 축적에 따라 연료전지의 성능손실로 이어진다. 이러한 성능손실을 연료전지의 농도손실 또는 물질 전달손실이라 부르며 농도손실에 따른 전압손실은 식 (4.8)과 같은 형태로 나타난다.

$$V_{conc} = Cn \frac{i_l}{i_l - i} \quad (4.8)$$

여기서 C 는 상수이며 반응물의 농도로 다음 식 (4.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{RT}{nF} \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (4.9)$$

실제 연료전지의 특성은 식 4.9에서 나타난 값보다 더 큰 C 값을 가지므로, 실험적으로 얻은 값을 주로 사용한다. 연료전지에서의 한계전류밀도 $[i_l]$ 에 따른 전압손실을 농도손실이라 하며, 높은 전류밀도 $[i]$ 가 한계전류밀도에 근접할수록 연료전지 성능에 많은 영향을 미치며 높은 손실을 나타낸다. 여기서 한계전류 밀도 $[i_l]$ 는 식 (4.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_l = nFD^{eff} \frac{C_R^0}{\delta} \quad (4.10)$$

식 (4.10)에서 δ 는 기체확산두께 $[um]$ 이며 D^{eff} 는 촉매층 유효 확산계수(0.01), C_R^0 는 평균 반응물 농도를 나타낸다. Fig. 4.4는 전류밀도에 따른 전압 농도손실

을 타나낸다.

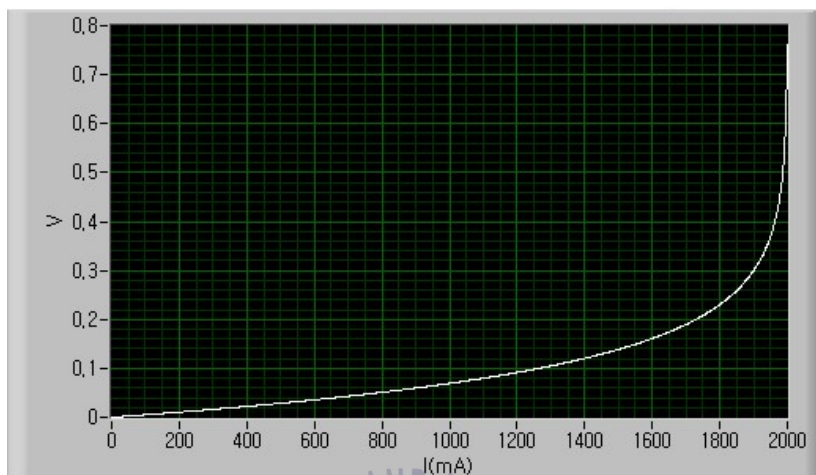


Fig. 4.4 Concentration loss for current density

전해질은 전기적으로 전도성이 없기 때문에 기체가 투과할 수 없는 것으로 간주되지만 일부 수소와 전자들은 전해질을 통하여 확산된다. 전해질을 통하여 확산되는 수소 분자로 인해 부하로 이동되는 전자들의 수가 감소하게 되고 작동 중 매우 적은 양이지만 높은 전류밀도에서는 상당한 양의 전하손실을 야기할 수 있다.

4.1.3 저항손실

전하 이동에 대한 저항이 연료전지의 전압 손실을 야기한다. 즉, 연료전지 내부 전하의 이동은 전류가 증가함에 따라 연료전지의 작동 전압을 선형적으로 감소시키며 이러한 손실을 저항손실 또는 IR손실이라 한다. 연료전지의 저항손실을 최소화하기 위해서는 전해질을 가능한 얇게 만들고 높은 전도성을 가지는 물질을 사용함으로써 최소화할 수 있다. 저항손실[V_{ohm}]은 전류밀도[i]에 따른 내부저항 R_i 에 비례하므로 식 4.11과 같이 나타낼 수 있으며 Fig. 4.5와 같이 나타난다.

$$V_{ohm} = R_i i \quad (4.11)$$

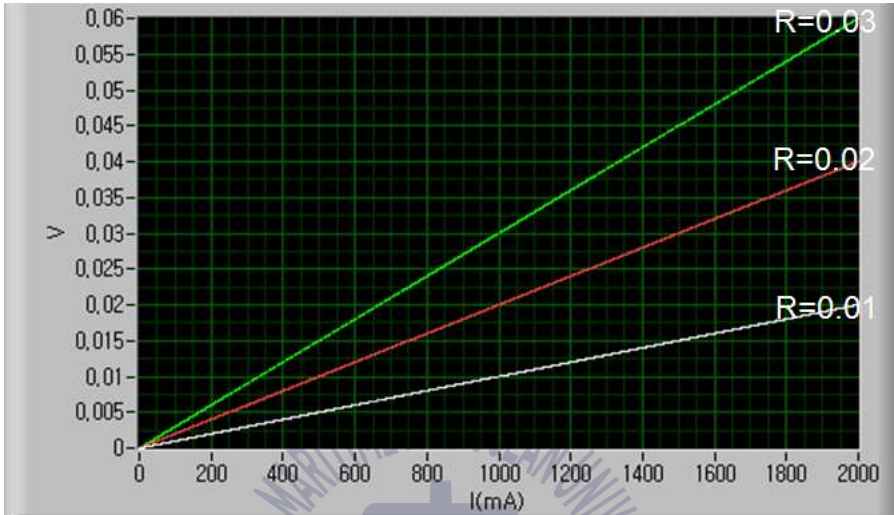


Fig. 4.5 Ohm loss for current density

4.1.4 연료전지 모델링

연료전지의 실제 전압은 열역학적 예상 전압에서 몇 가지 과전압 손실을 뺀 것으로서 식 (4.12)와 같이 구할 수 있다.

$$V = E_{thermo} - n_{act} - n_{ohmic} - n_{conc} \quad (4.12)$$

V 는 연료전지의 전압이며, E_{thermo} 는 연료전지가 화학적 반응으로 얻을 수 있는 열역학적 전압, n_{act} 는 반응 속도에 따른 활성화 손실, n_{ohmic} 는 이온과 전자 저항으로 인한 저항손실, n_{conc} 는 물질 수송에 따른 농도손실을 나타낸다.

연료전지 모델은 실제 건조중인 연료전지의 특성 값을 바탕으로 모델링하였다. 적용한 연료전지 모델은 450[cm²]의 활성화 면적을 가지며 60개의 셀을 직

렬로 연결하여 최대부하 303[A]에서 약25.5[kW]의 출력을 가지도록 구성하였다. Fig. 4.6은 연료전지 모델링의 블록다이어그램을 나타내며, Fig. 4.7은 연료전지 하나의 셀에 대한 모델의 I-V 곡선을 나타낸다.

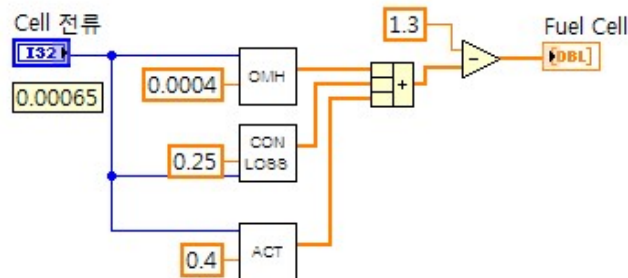


Fig. 4.6 Block diagram for fuel Cell modeling

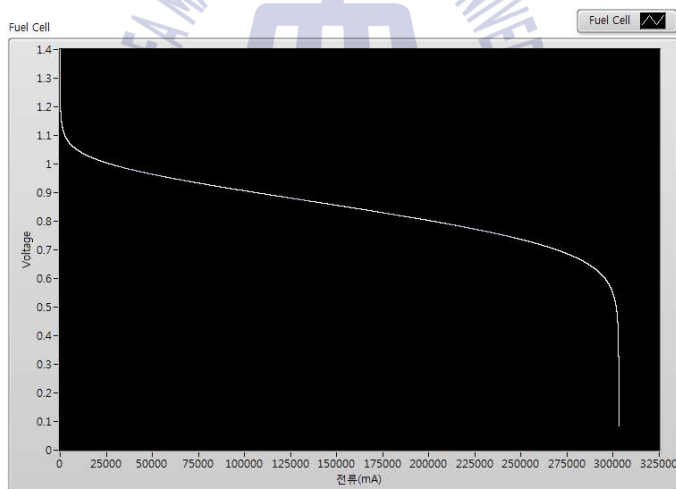


Fig. 4.7 I-V Curve of fuel cell

Fig. 4.7과 같이 연료전지 단위 셀은 저전압-고전류 시스템으로 일반적으로 연료전지 셀을 직렬 연결 하여 하나의 스택으로 사용되어지고 있다. Fig. 4.8은 연료전지 셀을 146개 직렬 연결하여 하나의 스택으로 만든 연료전지 스택의 I-P 곡선을 나타낸다.

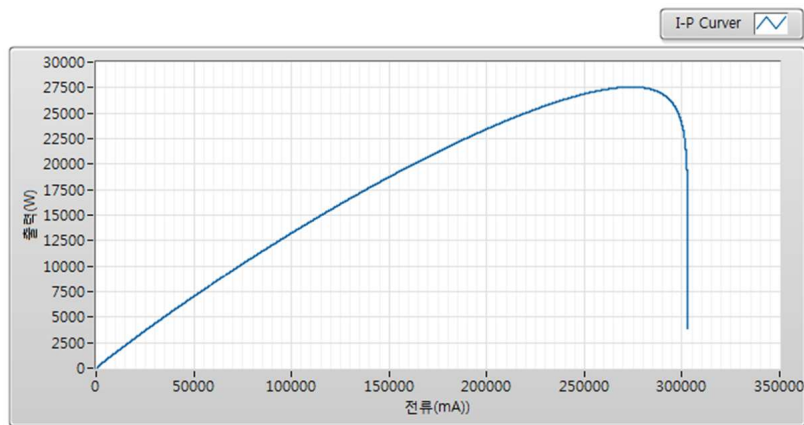


Fig. 4.8 I-P curve of Fuel cell stack(146cell)

4.2 컨버터 시뮬레이션

연료전지는 Fig. 4.7과 같이 저전압-고전류 출력을 가지는 발전시스템이다. 용량에 따라 연료전지는 다수의 셀을 직렬 연결하여 사용하거나 연료전지 출력단에 전력변환 장치인 컨버터(converter)를 설치하여 사용하게 된다. 연료전지를 사용자가 원하는 전압 및 출력을 내기 위해 전력변환 장치를 설치하는데 연료전지와 전력변환 장치를 하나로 통합하여 연료전지 시스템이라 한다.

본 시뮬레이션에 사용된 연료전지 모델은 하나의 셀이 303[A], 약 1.2[V]를 내게 되므로 146개의 셀을 직렬 연결하여 사용하였다. 그러나 실 선박의 main bus line은 배터리 전압에 맞추어 직류 330[V]를 사용한다. Table 4.1은 컨버터 사양을 나타낸다.

Table 4.1 Specification of DC/DC converter

Classification	Input	Output
Rated voltage	DC 105[V]	DC 330[V]
Rated current	260~284[A]	76[A]
Operation input voltage	DC 88 ~ 150[V]	
Operation input current	0 ~ 280[A]	
Control method	output voltage control	
Switching frequency	36[KHz]	

[illegible]

– 83 –

4.3 배터리 시뮬레이션

배터리는 연료전지 컨버터 출력이 부하에 못 미칠 때 연료전지 출력이 부하를 감당할 수 있을 때까지 보상작용을 하게 된다. 배터리 특성상 순간적인 출력변화에 강인하며 높은 출력 Charging-rate를 가지므로 연료전지 시스템과 연동되어 사용된다.

실 선박에 탑재된 배터리는 Lithium-Ion 배터리를 사용하였으며 세 개의 배터리 팩이 탑재되었다. 하나의 배터리 팩은 15.6[kWh]의 용량을 가지며, 자체 BMS를 탑재하고 있다. Table 4.2는 배터리 사양을 나타낸다.

Table 4.2 Specification of battery

Rated out voltage	DC 296[V]
Operating output voltage	DC 240 ~ 336[V]
Constant charge	0.5C(20[A])
Peak discharge	3[C]

배터리 모델은 방전에 관하여서만 진행하였으며, 높은 방전 Charging-rate를 갖추고 있기 때문에 연료전지 컨버터로 출력 부족분에 대하여 부하에 충분한 전력을 공급하도록 구성하였다.

4.4 선박부하

선박 추진 부하에 따른 연료전지 및 배터리의 연동 관계에 대하여 시뮬레이션을 진행하기 위해 실 선박과 유사한 부하특성을 가지는 부하를 만들 필요가 있다. 따라서 본 절에서는 사용자가 임의의 부하를 시간에 따라 생성할 수 있도록 하였으며 생성된 부하를 저장할 수 있도록 프로그래밍 하였다. 사용자가 임의로 생성한 부하는 텍스트 파일로 저장되어 연료전지 통합 시뮬레이션에서 읽어 부하로 적용할 수 있도록 하였다. Fig. 4.11은 연료전지 선박 부하생성 시뮬레이션의 블록다이어그램을 나타내며, Fig. 4.12는 연료전지 선박 부하생성 프론트 패널을 나타낸다.

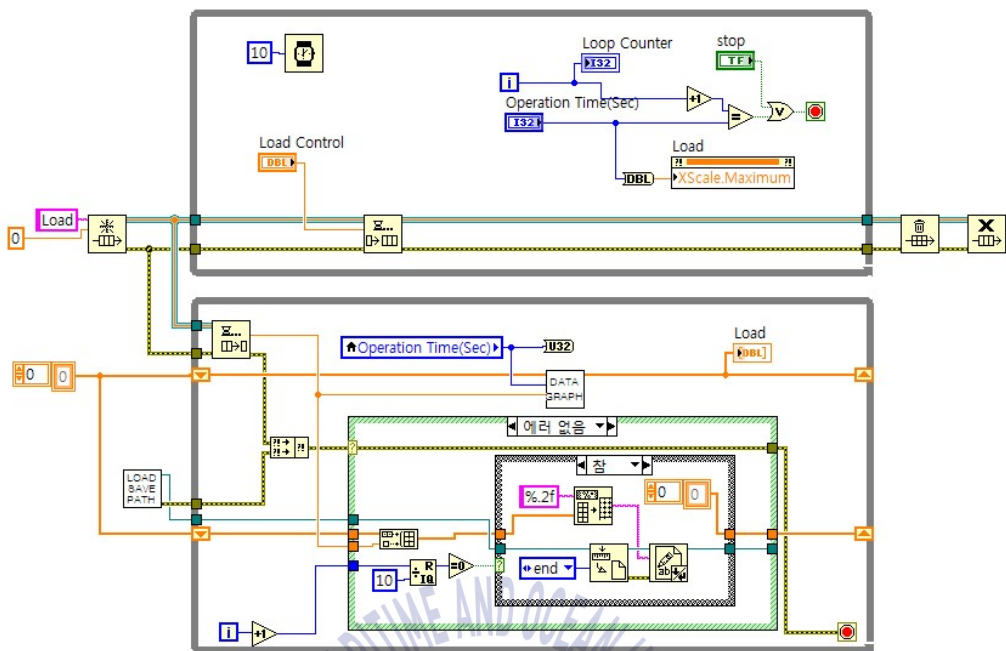


Fig. 4.11 Block diagram of load generation for fuel cell ship

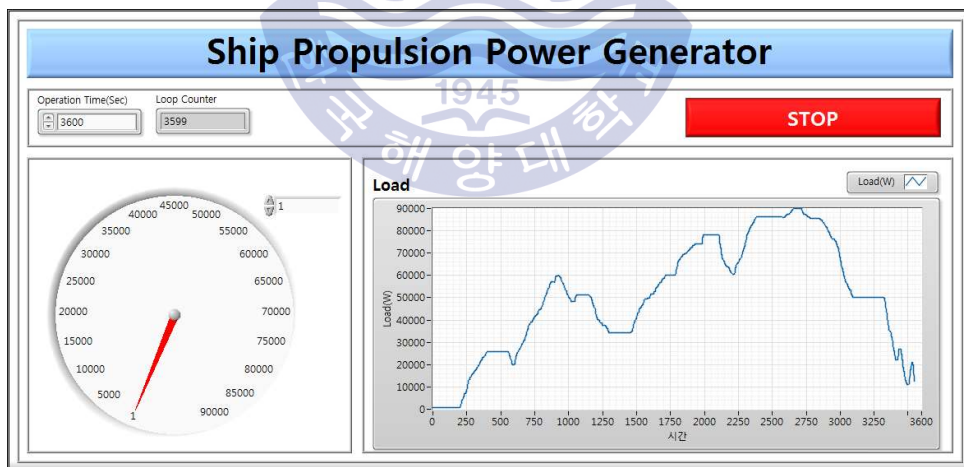


Fig. 4.12 Front panel of load generation for fuel cell ship

4.5 연료전지 선박 통합 시뮬레이션

개발하는 연료전지 선박은 water-jet 추진기 2개와 45[kW] 추진모터 2개를 사용하여 최대부하일 90[kW]의 출력을 낸다. 시뮬레이션의 구성은 연료전지 출력부, 컨버터 출력부, 컨버터 제어부, 배터리, 데이터 표시 및 저장부로 이루어져 있다. Fig. 4.13은 시뮬레이션 블록다이어그램과 각 부분의 기능에 대하여 나타낸다.

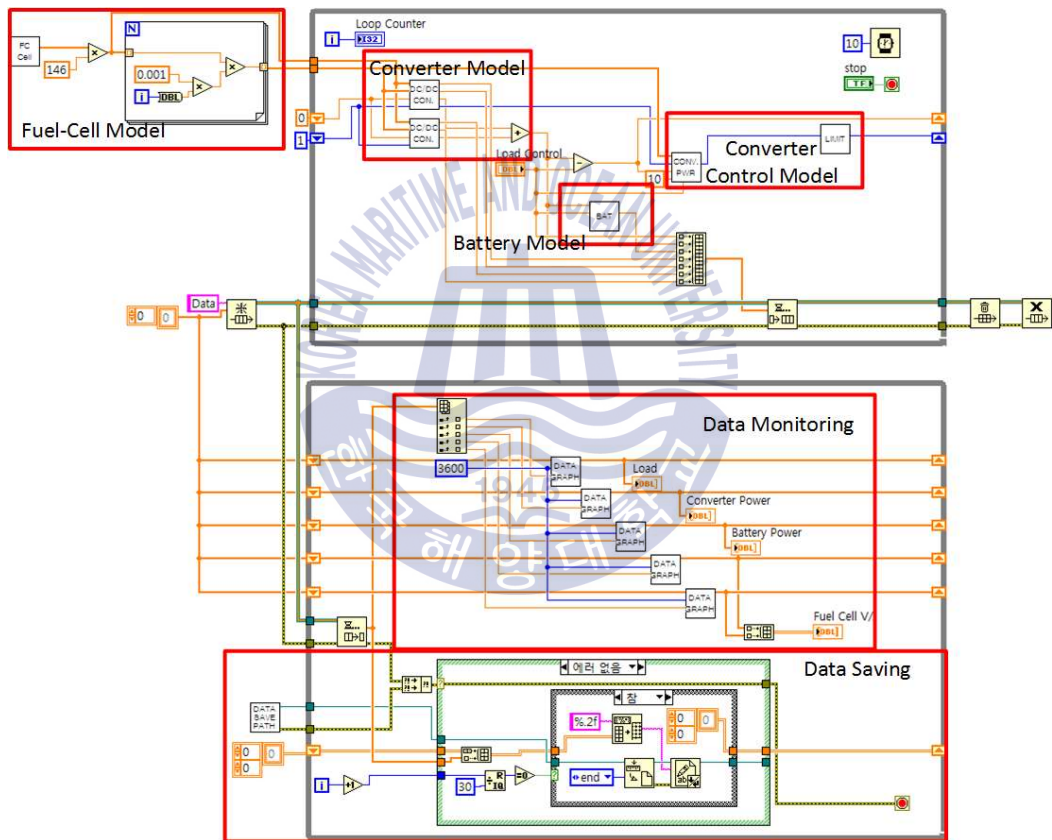


Fig. 4.13 Block diagram of fuel cell ship simulation

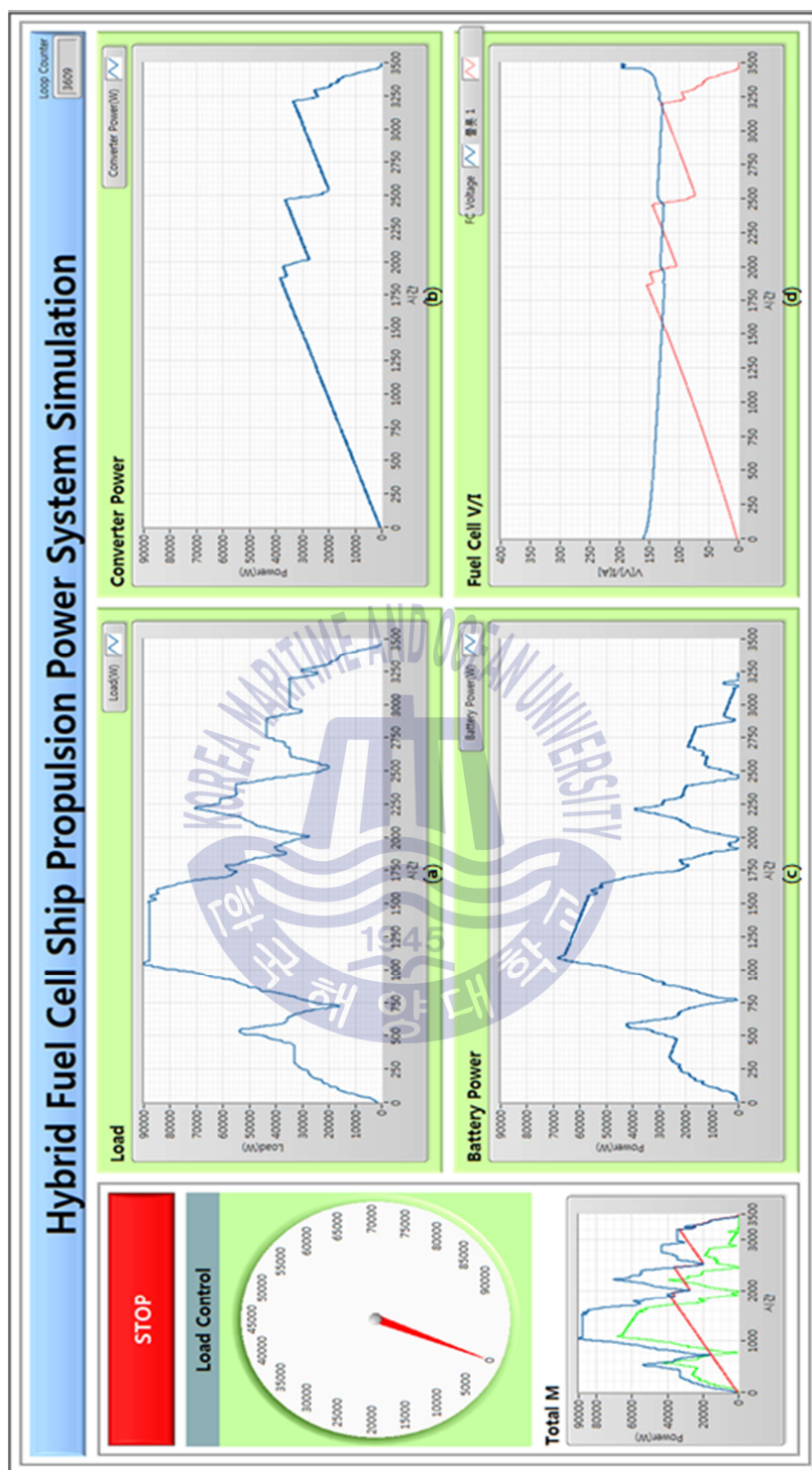


Fig. 4.14 Front panel of simulation for fuel cell ship

Fig. 4.14는 연료전지 선박 통합 시뮬레이션의 프런트 패널을 나타낸다. (a)는 연료전지 선박의 부하 변화 그래프이고 (b)는 연료전지 출력단에 설치된 컨버터의 전력 출력 그래프이다. 그리고 (c)는 배터리의 전력 출력 그래프이며 (d)는 컨버터 출력에 따른 연료전지 전압 및 전류 그래프이다.

4.6 연료전지 선박 통합 시뮬레이션 결과 분석

개발하는 연료전지 선박은 25[kW] 연료전지 2대로 최대 50[kW]의 출력을 낼 수 있으나, 선박의 추진 부하가 90[kW]이므로 연료전지만으로는 최대 출력을 낼 수 없다. 또한, 급격한 부하 증가변화에 연료전지만으로 대응할 수 없기 때문에 배터리가 연계된 하이브리드 추진시스템을 갖도록 하였다. 본 시뮬레이션을 통하여 선박 부하변화에 따라 연료전지와 배터리의 출력 상관관계를 확인하고자 하였다. Fig. 4.15는 연료전지 선박 부하에 따른 연료전지 및 배터리의 출력 상관관계를 나타낸다.

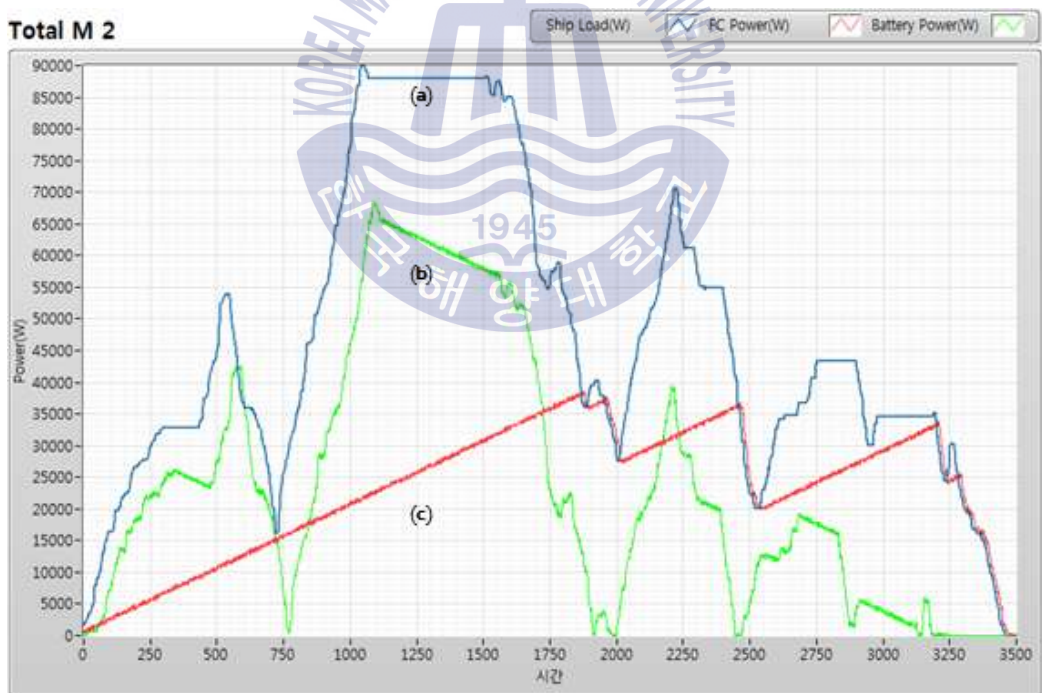


Fig. 4.15 Load and power graph of fuel cell ship

(a)는 선박의 부하변화를 (b)는 배터리 출력 전력의 변화를 (c)는 연료전지의 출력전력을 나타낸다. 위의 그래프를 보면 알 수 있듯이, 선박 부하가 급격하게 변할 때 연료전지와 배터리가 서로 전력을 보상하며 부하에 전력을 공급하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 연료전지가 출력반응이 느리기 때문에 부족한 전력부분은 배터리가 감당하며, 서서히 연료전지 출력이 증가함에 따라 배터리 출력이 감소함을 확인할 수 있었다.



제 5 장 연료전지 선박 건조, 운항 및 데이터 결과 분석

5.1 연료전지 선박 건조 및 운항

5.1.1 콘솔 설계

연료전지 선박 시스템의 설치를 위하여 콘솔 설계를 진행하였다. 콘솔은 사용자가 선박의 운항을 위하여 가장 오랫동안 제어를 진행하는 장소이며, 사용자가 한눈에 연료전지 선박의 상태를 확인하고 제어할 수 있어야 한다. 다음 Fig. 5.1은 콘솔 구성도이다.

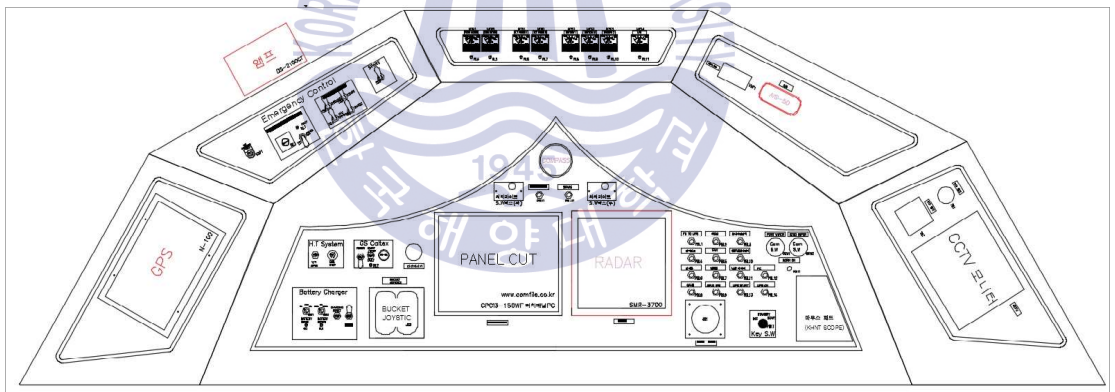


Fig. 5.1 Configuration of central control console

콘솔의 구성은 중앙에 제어 스위치 및 추진 레버를 설치하고 주변에 게이지 및 모니터링 장비, 비상스위치를 배치하였다. 다음 Fig. 5.2는 콘솔 중앙 제어 패널(1)의 모습이다.

콘솔 중앙 제어 패널의 가운데는 통합 제어 모니터링이 가능한 panel PC와 항해통신장비(radar)가 배치되었고, 운항시나리오에 따라 운항에 필요한 장비들을 운전모드를 통해 on/off 가능하다. 다음 Fig. 5.4는 콘솔 중앙 제어 패널(3)의 모습이다.

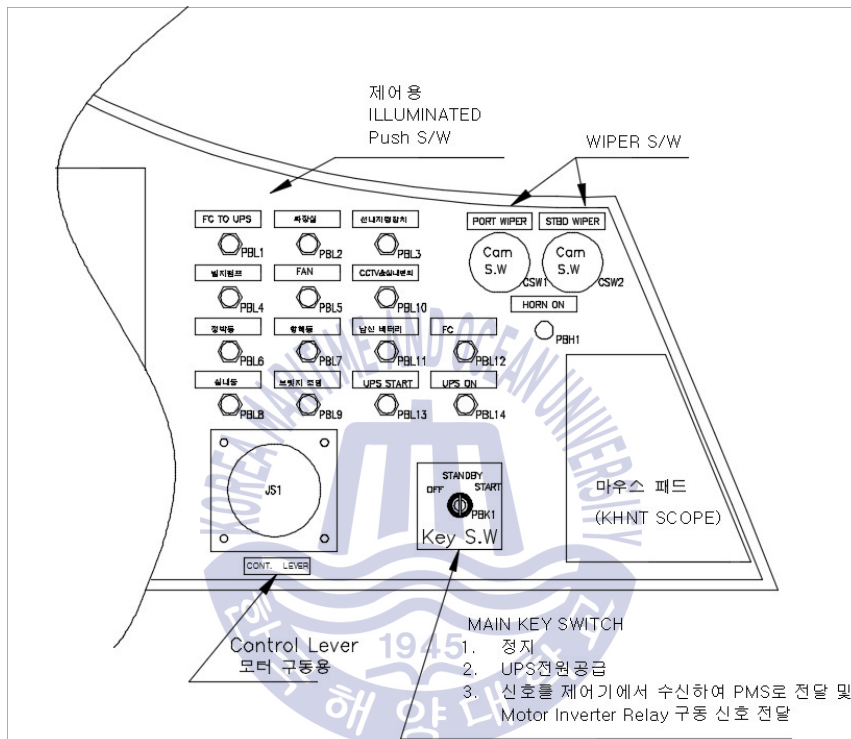


Fig. 5.4 Configuration of central console panel (3)

선내 시설 및 UPS 전원 on/off 가능하며, Key S.W를 통해 연료전지 선박을 운용할 수 있게 구성되어 있다.

5.1.2 연료전지 선박용 시스템

본 논문의 3장에서 설계된 각 시스템과 4장에서 시뮬레이션한 시스템간 연동 실험 결과를 기반으로 연료전지 선박의 시스템을 설치하였다. 다음 Fig. 5.5는

연료전지 선박 내부 전기 설비를 설치하는 모습이다.



Fig. 5.5 Figure of inner electronic system installation

14개의 수소용기를 격실에 효율적이고 안전하게 탑재할 수 있도록 설계 변경을 통하여 3개의 모듈로 분리하여 장착하였다. 특히, 수소 배관에 외부 충격이 발생하지 않도록 배치 및 설치하였으며, 배치 후 수소주입 전 기밀시험을 통해 안전성을 확보 하였다. 다음 Fig. 5.6은 수소 탱크의 설치모습이다.



Fig. 5.6 Figure of hydrogen tank system installation

연료전지 모듈의 배치는 수소탱크와의 배치를 종합적으로 고려하였고, 이에 따른 최적의 배치를 수행하였다. 다음 Fig. 5.7은 연료전지 모듈을 탑재하는 모습이다.



Fig. 5.7 Figure of fuel-cell system installation

Fig. 5.8은 콘솔의 모습으로 각 장비에 귀속되는 S.W 및 하드웨어 장비들을 c 콘솔 치수에 맞게 도면을 작성하고, 콘솔 panel은 내약품성, 내식성이 뛰어난 SUS304 재질을 사용하였다. 또한 water Jet 구동 레버를 이용하여 버킷의 상하 조절이 가능하고, 스로틀 레버를 이용하여 모터를 구동하여 전진 후진이 가능하다. 메인 panel PC를 통해 배터리, 연료전지, BMS등의 상태를 확인하여 충전 또는 방전하였을 때의 데이터를 볼 수 있도록 구성되었다. 또한, 운행 시 출력데이터를 값으로 표기하여 정확한 데이터를 확인할 수 있다.

선내 전원 장치 UPS의 12[V], 24[V], 220[V], 상시 전원을 조타실에서 on/off가 가능하도록 구성하였고, 육상 충전과 수소충전을 선택스위치를 탑재하여 사용자의 판단에 따라서 충전 가능하도록 구성하였다. 특히, 수소 내부 누설 시에 부저(buzzer)를 통해서 사용자에게 알려주도록 하였다.



Fig. 5.8 Figure of central control console

5.1.3 연료전지 선박 해상 시운전 및 운항

실 해상에서 테스트 전에 각 장비 간 통신으로 연동되는 부분은 육상에서 테스트를 진행하였다. 육상에서 각 장비 간 통신 연동이 안정적으로 되었다 하더라도 모든 장비가 연동되는 경우와 추진 전력으로 인한 노이즈, 선체 진동으로 발생하는 문제 등 많은 문제점을 야기할 수 있기 때문에 육상테스트 이후 해상 시운전 테스트는 필수적이다. Table 5.1은 해상 시운전 내용이다.

Table 5.1 Ship test information

장소	시애틀마린 해역(부산 강서구 녹산동 215)
일정	2015.04.29. ~ 2015.05.15
주요 시험 항목	탑재시스템 간 연동시험 통신 EMI 시험 하이브리드 추진성능 시험 최대 속력 시험 복원성 시험

해상 시운전은 육상과 달리 추진시스템 전력공급에 따른 통신 노이즈 문제, 각 장비 연동 문제, 예기치 못한 Trip 등의 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 장시간 여러 조건에서 시운전을 통하여 선박에 발생하는 문제점을 파악하고 해결하는 것은 매우 중요한 과정이다. Fig. 5.9는 해상 시운전 모습이다.

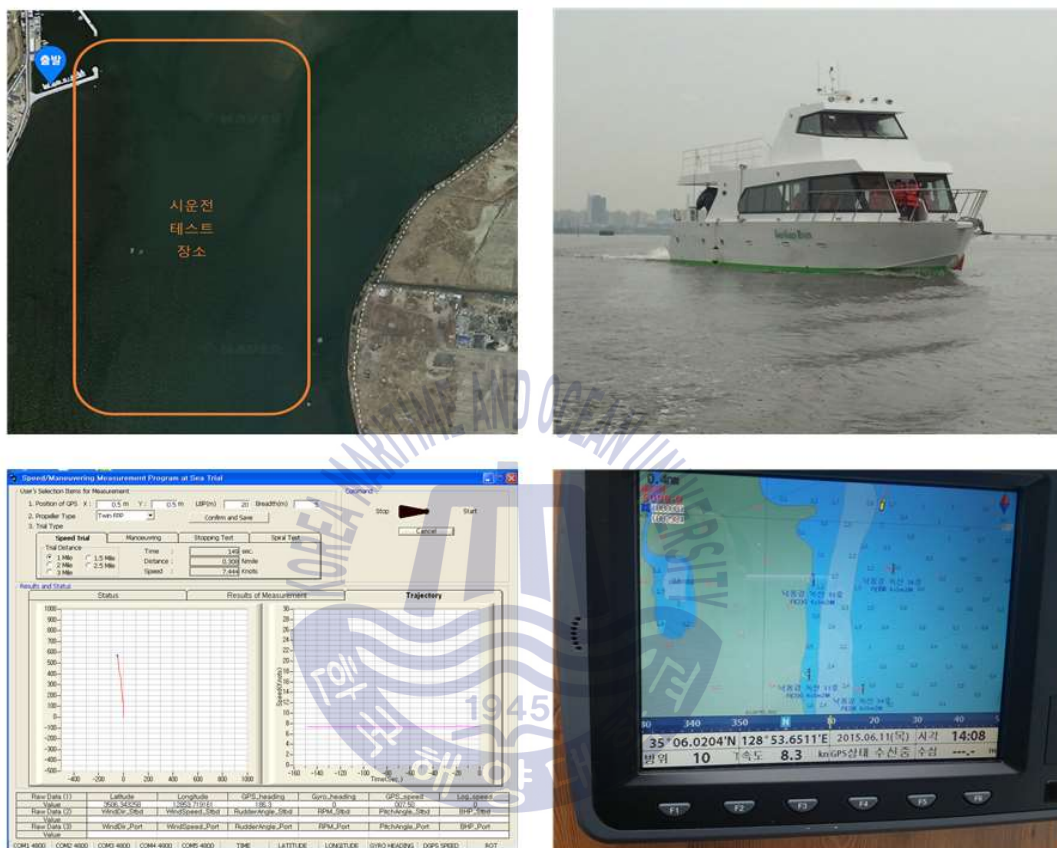


Fig. 5.9 Sea trials

5.2 데이터 결과 분석

본 논문에서는 연료전지 추진시스템을 장착한 선박을 대상으로 연료전지 전력 시스템을 설계하고 연구하였다. 본 연료전지 선박의 추진체계는 water jet 추진기 방식으로 45[kW]급 추진모터가 양쪽에 2개 설치되어 최고속력 8[knots] 이상일 때 90[kW]이상의 전력을 소모하게 된다. 본 연료전지 선박에 탑재된 연

료전지는 25[kW]급 2대로 최고속력에 필요한 90[kW]의 전력에는 많이 부족하다. 이에 따라 연료전지의 부족 전력을 보완하면서 급격하게 변화하는 추진전력으로부터 연료전지의 소손을 방지하기 위하여 배터리를 병렬 연결한 하이브리드 추진 시스템을 구성하였다. 탑재된 배터리는 15[kWh] Lithium-ion Battery 3팩을 탑재하였다.

5.2.1 추진 모터 제어시스템

추진 모터는 모터 회전수에 따라 급격한 전력소모 증가를 보이며 갑작스런 추진계통의 속도 및 외부상태(해류 및 조류 등)에 따라 필요전력이 급격하게 변하게 된다.

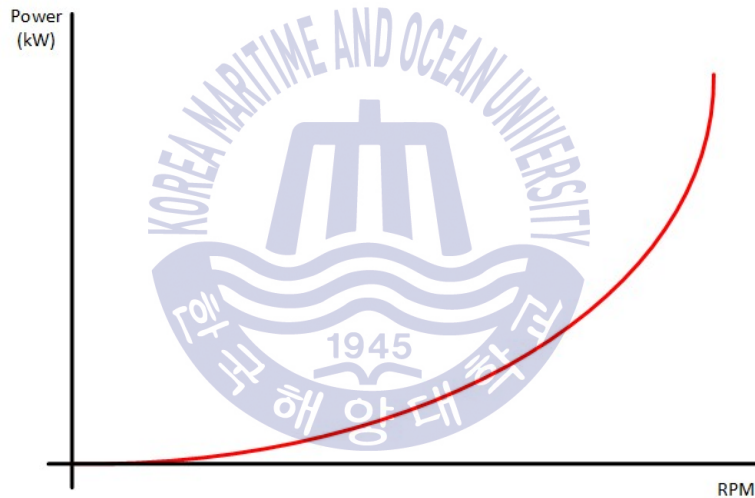


Fig. 5.10 Propulsion motor RPM-Power curve

연료전지의 특성상 급격한 전력부하 증가는 연료전지의 수명 및 내부구조에 좋지 않은 영향을 미치게 되므로 피하는 것이 좋다. 개발한 연료전지 선박에서는 급격한 추진모터의 갑작스런 전력증가 방지를 위하여 추진 모터 제어용 인버터에 전류 증가 제한치를 설정하였으며, 중앙제어기에서 사용자가 텔레그래프신호를 급격히 올리더라도 중앙제어기를 통하여 인버터에 전달하는 신호를 제어하여 시간에 따라 천천히 사용자의 속도 지령 값까지 상승하도록 구현하였

다. 또한, 사용자가 사용하는 텔레그래프의 신호에 노이즈가 있더라도 제어기에서 PI(비례,적분)제어를 통하여 노이즈를 필터링하여 보다 안정적으로 동작하도록 구성하였다. Fig. 5.11은 텔레그래프로 추진모터를 제어할 때 연료전지의 응답특성을 고려하여 텔레그래프 요청 신호보다 천천히 안정적으로 제어하고 있는 동작을 나타내고 있다.

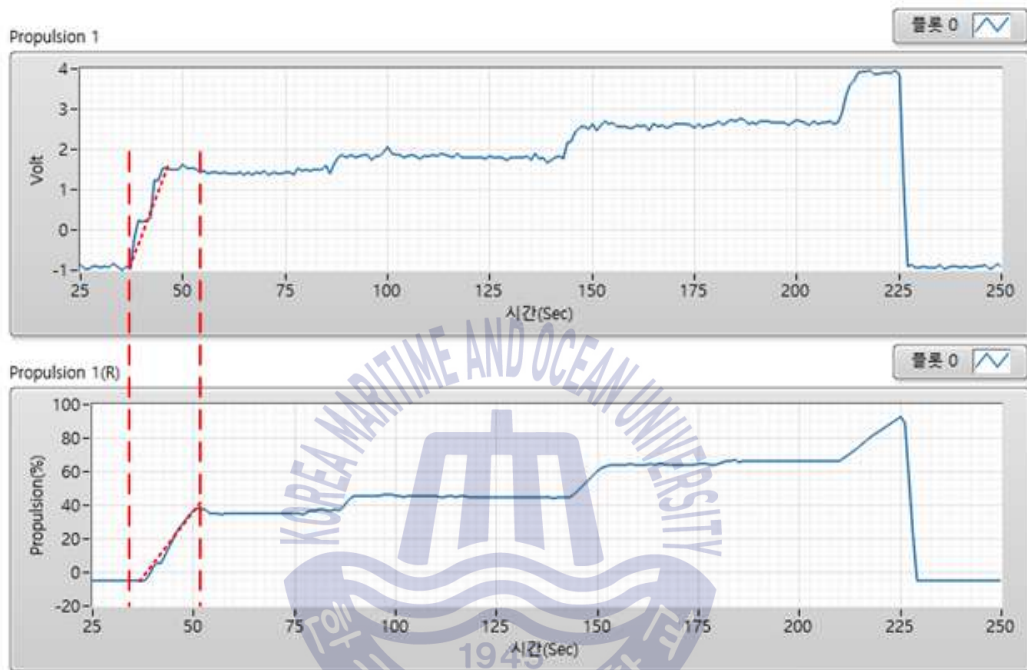
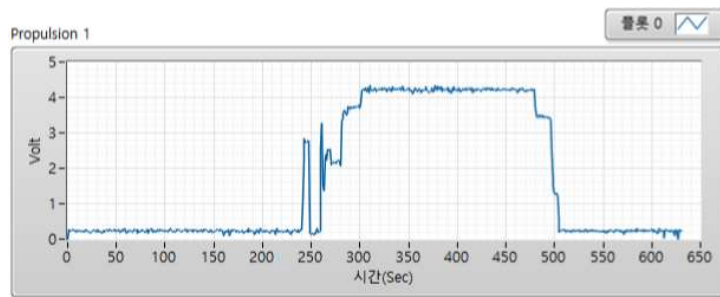


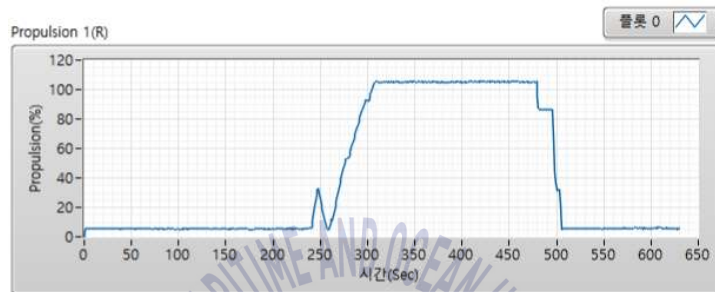
Fig. 5.11 Propulsion motor control for telegraph signature

5.2.2 추진전력 연동 시스템

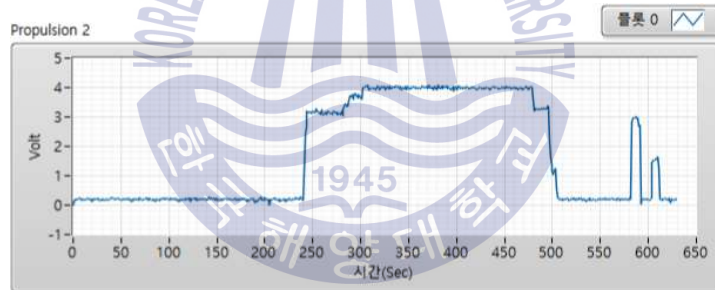
연료전지 선박의 추진전력을 연료전지만으로 모두 감당할 수 없으며, 급격히 변화하는 전력변화로부터 연료전지의 소손을 방지하기 위해 전력시스템에 연료전지와 배터리가 하이브리드된 전력시스템을 설계하였다. Fig. 5.12은 인버터에 사용자가 인가하는 지령치를 나타내었다. (a)는 연료전지 선박의 1번 인버터에 사용자가 직접 지시하는 지령전압 이고, (b)는 실제로 1번 인버터에 입력되는 신호이다. (c)는 연료전지 선박의 2번 인버터에 사용자가 직접 지시하는 지령전압 이고, (d)는 연료전지 선박의 2번 인버터에 입력되는 신호이다.



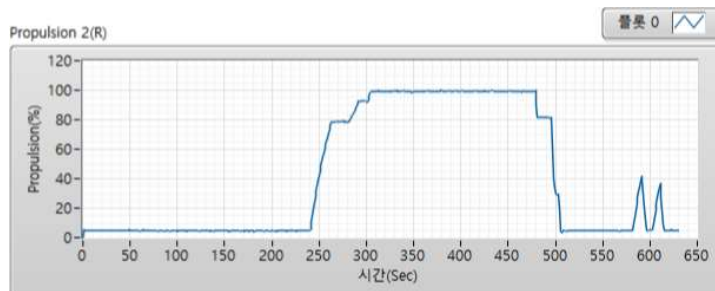
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.12 Inverter control curve

Fig. 5.13은 인버터 지령값에 따라 출력되는 연료전지의 발전 전력이다. (a)는 1번 연료전지에서 출력되는 전력을 나타내었고, (b)는 2번 연료전지에서 출력되는 전력을 나타내었다.

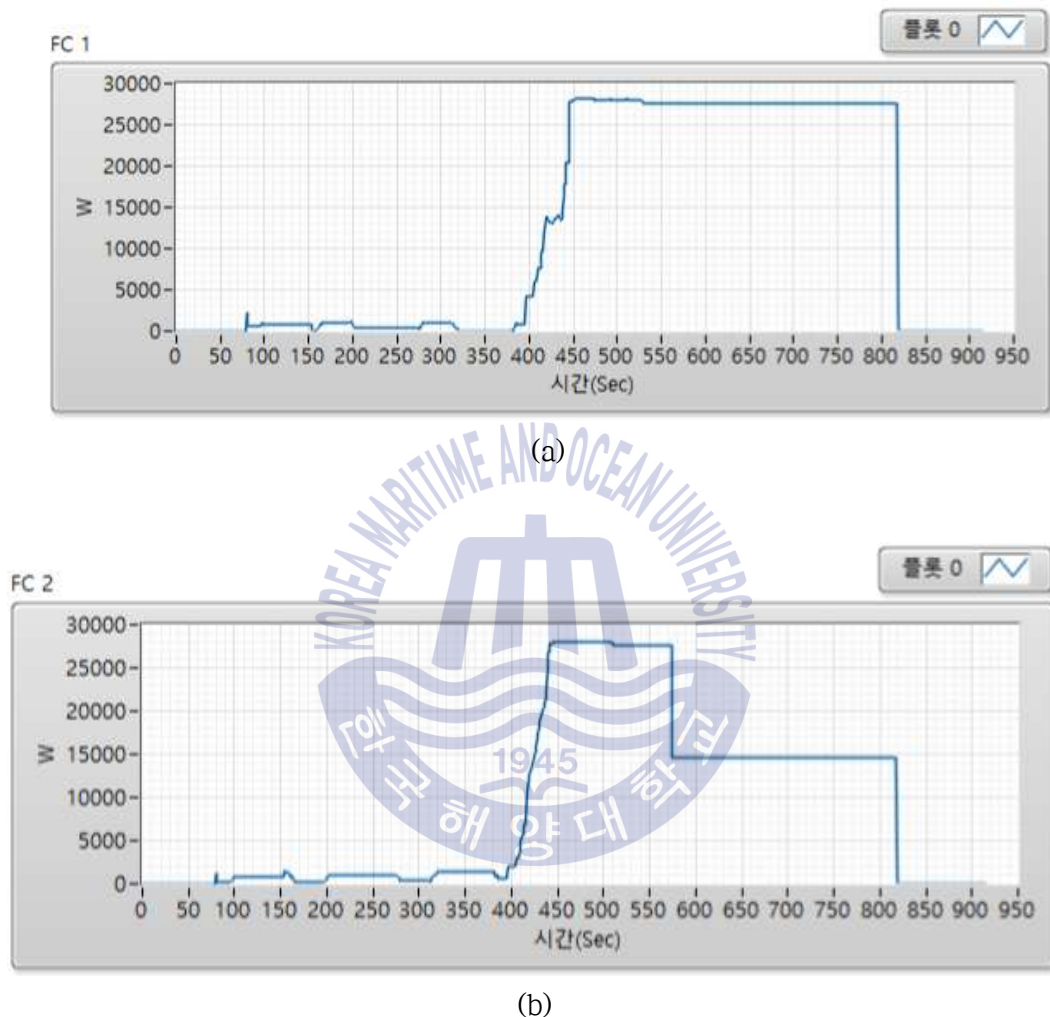
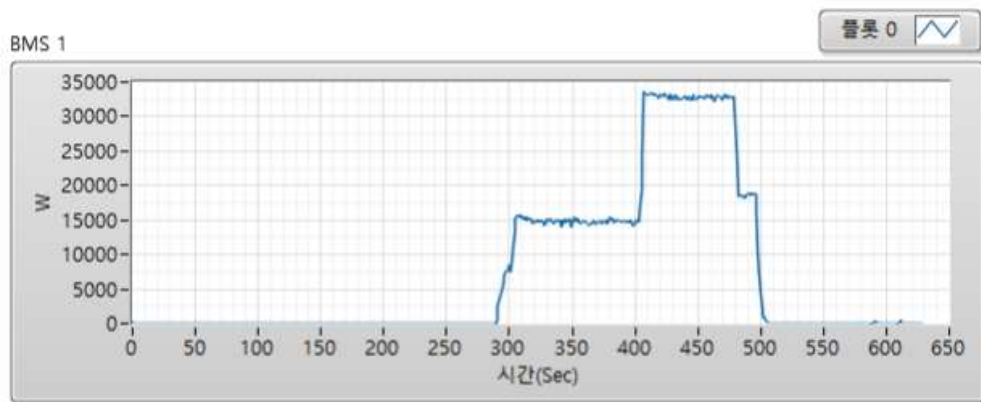
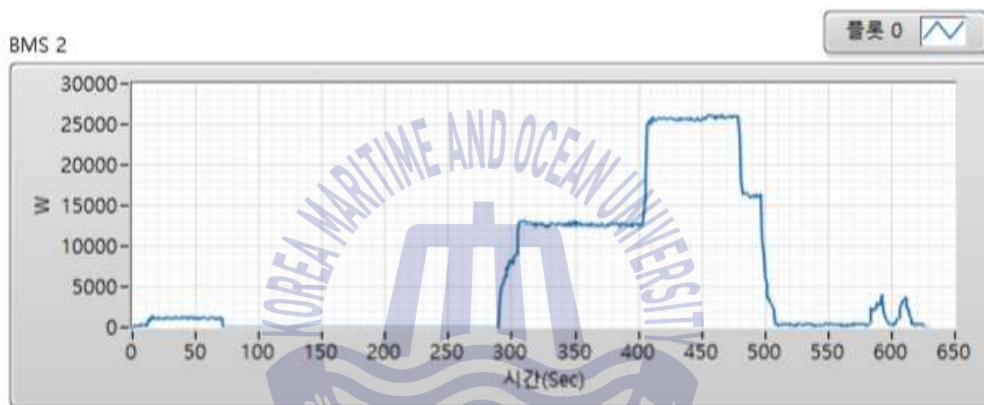


Fig. 5.13 Fuel cell output power curve

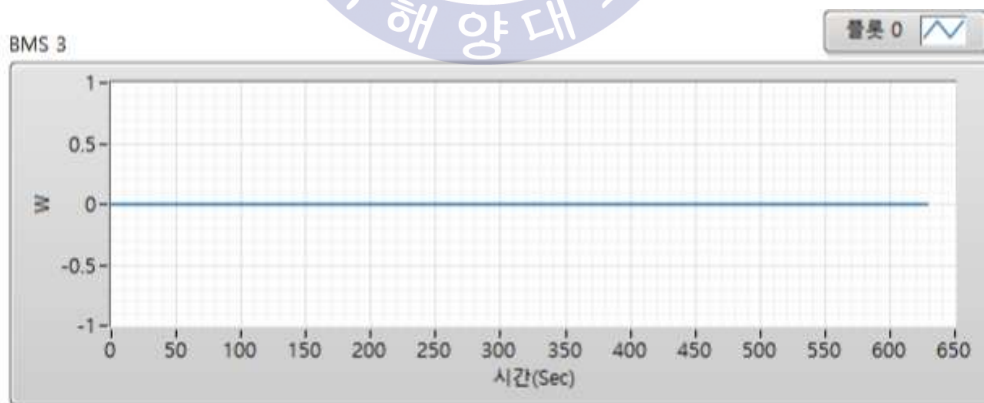
Fig. 5.14는 BMS에서 출력되는 전력의 곡선이다. 연료전지의 느린 응답특성의 개선과 연료전지에서 부족한 추진전력을 출력한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.14 BMS output power curve

Fig. 5.12, 5.13, 5.14에서 추진속도에 따라 필요한 전력공급을 1차적으로 연료 전지에서 감당하며, 부족한 전력을 세 개의 배터리에서 전력을 공급함으로써 안정적으로 추진시스템에 전력을 공급하고 있는 모습을 확인할 수 있다. Fig. 5.14를 보면 배터리 SOC 및 에러 상태에 따라 배터리를 보호하기 위해 배터리 팩이 자체적으로 전력공급을 중단하여 배터리로부터 발생할 수 있는 사고(화재, 폭발)등을 사전에 방지하도록 구성하였으며, 배터리 팩에 문제가 생기더라도 나머지 배터리 팩과 연료전지만으로 선내 추진시스템에 전력을 안정적으로 공급되고 있음을 확인할 수 있다.



제 6 장 결 론

본 논문은 국내 최초로 연료전지 기반의 선박 추진체계에 대해 이론에서부터 연동시스템 개발, 육상시험, 실제적인 연료전지선박 설계, 건조 및 해상시운전을 통하여 각 연구 단계별 결과물에 대한 비교 분석을 수행하여 50kw급 연료전지시스템을 탑재하여 추진체계를 구성한 최적화된 한국형 50인승 연료전지선박을 연구개발한 내용이다.

연료전지선박은 일반선박 개발 개념과 달리 연료전지의 출력 특성에 맞추어 추진체계 구성, 추진 제어장치 및 통합제어시스템을 구성하여야 하며, 선박의 크기, 선형, 속력 또한 연료전지 하이브리드 추진체계에 적합하도록 설계 및 연구 개발하여야 한다.

본 연료전지선박 연구개발은 연료전지의 출력 특성을 기준으로 선박 출력단에서의 추진 모터 및 추진기 효율을 고려한 최적화된 추진체계를 구성하였으며, 본 선박의 속력 대 마력 특성과 연료전지의 발전 속도와의 상관관계 해석을 통하여 최적화된 시스템 및 통합제어장치를 구성하였다.

연료전지의 반응 및 응답속도는 배터리에 비하여 매우 느리며 빠른 전력 증가 요구는 연료전지의 수명 감소 및 소손의 주원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 갑작스런 선내 부하 증가나 추진 부하 증가에 따른 전력 보상을 위해 BMS 및 통합제어시스템을 연구 개발하여 요청전력이 급격히 증가하더라도 연료전지에서는 감당 가능한 추진전력만 인버터에 전달하게 하여 제어 반응이 다소 느리더라도 안정적으로 운항이 가능하도록 구성하였으며, 배터리와 연계된 연료전지 시스템에서 추진부하 증가 속도를 완만하게 증가시켜 연료전지가 감당 가능한 최적 점을 찾아 선박에 적용함으로써 사용자가 원하는 선박 속력까지 최대한 빠르게 추종 가능하도록 연구개발 하였다.

연료전지시스템을 분석하여 연료전지선박에 적합한 연료전지시스템을 제안하

고 해상환경에 맞게 필요한 연료전지시스템의 토폴로지를 선정하였다. 연료전지의 느린 부하 응답특성 문제를 보완하는 전력시스템을 선정하여 선정된 연료전지 전력시스템을 각 부분별로 NI의 LabVIEW를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 이 시뮬레이션을 바탕으로 부하변화에 따른 연료전지 시스템과 배터리의 변화를 확인할 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 병렬 하이브리드 구조에 대한 토폴로지의 안정성을 확인할 수 있었다.

제어 알고리즘과 전력시스템을 검증하기 위하여 실제 연료전지선박을 설계, 건조 및 해상 시운전을 수행하였다. 실제 해상 시운전 결과, 본 연료전지 선박은 알고리즘에 맞게 부하전류에 따라 연료전지의 출력변화를 효율적으로 대응하는 것을 확인할 수 있었으며, 배터리 또한 부족한 전력분을 안정적으로 추진 시스템에 전력을 공급함을 알 수 있었다.

연료전지선박에 대한 국내 선급규정이 없어 유사선박 제반규정[선박안전법, 소형선박의 구조 및 설비 기준, 알루미늄선의 구조기준, 안전/소화에 관한 기준 등]을 적용하여 설계하였고 선박안전기술공단으로부터 도면 승인을 득하여 건조 하였으며, 해양수산부로 부터 우선 임시 항해허가증을 획득하여 해상시운전을 수행하였다. 또한, 본 개발 선박 및 향후 연료전지선박의 신뢰성 및 안정성 확보를 위해서 선급규정 제정 및 인증을 위한 규정(안)을 한국선급에 제출하여 규정 제정을 요청하였다.

향후 본 논문에서 제안한 연료전지선박에 대한 전력시스템 설계와 토폴로지, 알고리즘, 해상시운전 결과, 선급규정을 바탕으로 다양한 제어 방법과 토폴로지에 대한 연구를 진행하여 좀 더 최적화되고 안정적인 토폴로지 및 제어 방법 연구가 진행될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 한원희, 최정식, 최재혁, 2010. 수소에너지 기술 개발 현황과 선박적용 동향. 해양안전학회지, 제16권, 제3호, pp.313-320.
- [2] 정영석, 유권중, 강기환, 송진수, 김홍성, 2000. 태양광·풍력 복합발전용 PCS시스템 제어특성 분석. 전력전자학회학술대회, 제5권, 제1호, pp.19-25.
- [3] 오진석, 조관준, 2009. 태양광 및 풍력 하이브리드 발전 시스템에 관한 연구. 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제8호, pp.1226-1231.
- [4] 조경진, 2009. 연료전지 산업의 용도별 개발현황 및 향후 전망. KDB 산은월보, 제647호, pp.118-136.
- [5] Frano Barbir, 2007. PEMFC Fuel cell. 1st Edition Elsevier.
- [6] 한상석, 이필형, 이재영, 박창수, 황상순, 2008. 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)에서 부하변화율과 당량비가 과도응답특성에 미치는 영향. 한국자동차공학회 학술대회, pp.2115-2120.
- [7] 허민, 박영준, 김득상, 조용석, 2006. 부하조건 변화에 따른 PEMFC의 동적 출력특성 실험 및 모델링. 한국자동차학회 학술대회, pp.1760-1765.
- [8] 정학근, 한수빈, 정봉만, 박석인, 유승원, 김규덕, 2000. PEM형 연료전지 전력처리시스템 설계 연구. 전력전자학회학술대회, pp.682-684.
- [9] 정유라, 최용성, 황종선, 이경섭, 2009. PEM 연료전지의 전력-전류, 전압-전류 특성에 관한 연구. 전기학회, 제58권, 제4호.
- [10] 한국조선협회, 2008. 선박용 연료전지 및 연료전지선박의 개발 기술기획 1차보고서. 한국조선협회
- [11] 이정민, 정홍주, 정준모, 서인영, 한세희, 2006. 계통연계형 가정용 연료전지 시스템의 전력제어에 관한 연구. 전력전자학회학술대회, pp.263-265.
- [12] 송유진, 2005. 가정용 연료전지 시스템. 조명·전기설비학회, 제19권, 제2호, pp.38-43.

- [13] 이남수, 정구민, 안현식, 김도현, 2005. 연료전지 하이브리드 자동차의 에너지 운용 전략에 관한 기술조사. 정보 및 제어학술대회, pp.511-513.
- [14] 송유진, 2007. 연료전지 자동차용 전력변환 및 제어기술(발표자료). 에너지기술연구원.
- [15] 이홍찬, 2009. 해양레저 장비에 연료전지 적용(발표자료). 중원대학교 에너지환경연구소.
- [16] Di Wu, 2007. Status Review of Power Control Strategies for Fuel Cell Based Hybrid Electric Vehicles. IEEE Canada Electrical Power Conference, pp.218-223.
- [17] 이기호, 김종수, 강현수, 이병국, 2007. 연료전지-배터리 하이브리드 전력시스템용 양방향 DC-DC 컨버터. 대한전기학회 EMECS학회 학술대회, pp.264-265.
- [18] 김민조, 정진범, 김희준, 이백행, 2006. 자동차용 양방향 DC-DC 컨버터의 회로특성에 관한 연구. 대한전기학회 학술대회, pp. 952-953.
- [19] 안원진, 박남주, 현동석, 2006. 부하변동에 따른 연료전지의 전력 보상 기법. 전력전자학회 학술대회, pp.72-74.
- [20] Rugaju, M., Janse van Rensburg, J.F., Pienaar H.C.vZ.. Full Bridge DC-DC converter as Input Stage for Fuel Cell based Inverter System. Department of Applied Electronics and Communications.
- [21] 한무호, 조내수, 2010. 1차 지연회로를 사용한 전기차 충전용 ZVS Full-Bridge 컨버터 구동회로 설계. RIST 연구논문, 제24권, 제3호, pp.162-167.
- [22] 문상필, 김동현, 이현우, 권순걸, 서기영, 2006. 연료전지 발전시스템에 적용된 고주파 절연형 ZVZCS PS-PWM DC-DC 컨버터의 설계 및 특성 해석. 조명·전기설비학회논문지, 제20권, 제4호, pp.21-28.
- [23] 안태영, 봉상철, 허태원, 2009. 위상제어방식 풀브릿지 컨버터의 전력손실과 변환효율 분석에 관한 연구. 전력전자학회논문지, 제14권, 제3호, pp.228-234.
- [24] Muhammad H. Rashid, 2005. Power Electronics. 3rd Edition Pearson prentice hall.
- [25] 권형남, 정홍주, 김래영, 최태식, 송종환, 2002. 연료전지용 전력변환장치의 DC-DC 컨버터 개발. 전력전자학술대회, pp.94-97.

- [26] V.H. Johnson, 2002. Battery performance models in ADVISOR. Journal of Power Sources 110, pp.321-329.
- [27] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, 2009. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. World Electric Vehicle Journal, Vol.3, pp.1-10.
- [28] Oilivier Tremblay, Louis-A Dessaint, Abdel-Iliah Dekkiche, 2007. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. IEEE, pp. 284-289.
- [29] Shuhui Li, Bao Ke, 2011. Study of Battery Modeling using Mathematical and Circuit Oriented Approaches. IEEE.
- [30] S.Piller, M. Perrin, A. Jossen, 2001. Methods for State-ofcharge Determination and Their Applications. Journal of Power Sources, Vol.96, pp.113-120.
- [31] I. Snihir, W. Rey, E. Verbitsky, A.B. Ayeb, P.H.L. Notten, 2005. Battery Open-Circuit Voltage Estimation by a Method of Statistical Analysis. Journal of Power Sources, Vol. 159, pp.1484-1487.
- [32] G. Plett. et. al, 2004. Extended Kalman Filtering for Battery Management Systems of LiPB-based HEV Battery Packs Part1: Background. Journal of Power Sources, Vol. 134, pp.252-261.
- [33] S. Buller, M. Thele, E. Karden, R.W.D. Doncker, 2003. Impedance-based Non-linear Dynamic Battery Modeling for Automotive Applications. Journal of Power Sources, Vol. 113, pp.422-430.
- [34] 이지호, 전남주, 이형철, 2009. HIL 시뮬레이션에 의한 하이브리드 에너지 저장장치 탑재 전동차의 가능성 연구. KSAE 부문종합 학술대회, pp.1745-1750.
- [35] Prabha Acharya, Prasad Enjeti, Ira J. Pitel, 2004. An Advanced Fuel Cell Simulator. IEEE, pp.1554-1558.
- [36] 엄준현, 임영철, 정영국, 2009. DSP기반 연료전지 하드웨어 시뮬레이터 구현. 조명·전기설비학회논문지, 제23권, 제1호, pp.59-68.

- [37] SANKET A. UNHALE, B.E.M.E A THESIS IN MECHANICAL ENGINEERING, 2004. APPLICATION AND ANALYSIS OF RANS BASED TURBULENCE MODELS FOR BLUFF BODY AERODYNAMICS, PP.27-40
- [38] 산업통상자원부, 2015. 50kW급 연료전지 기반 선체 및 제조기술 개발, 산업통상자원부



감사의 글

2008년 초 학위 과정을 시작할 당시는 이렇게 오랜 기간 동안 연구를 하리라고는 생각하지 않았었습니다. 지금이 2016년 1월이니까 8년이라는 시간이 지나왔습니다. 참으로 많은 시간이 흘렀습니다. 일을 하면서 새로운 것을 알기 위해 공부하고 연구 한다는 것이 얼마나 어려운가를 알게 하는 소중한 시간들이었습니다.

조선공학 전공자로서 생소한 학문인 메카트로닉스를 접한다는 것이 쉽지는 않았지만 해군 함정 설계 시 전기, 제어에 대한 시스템공학 경험 및 기초공학을 이해하고 있었기에 학위에 필요한 과정을 소화할 수 있었다고 생각합니다.

이 논문에 수록된 내용들은 국내에서는 최초로 수소연료전지선박에 대하여 약 4년 동안 40억 원 이상을 투입하여 많은 시행착오와 개선을 통한 상용화 연구개발을 수행하면서 연료전지선박에 대한 설계 및 건조, 탑재 시스템 설계 및 제작, 시뮬레이션, 공인인증시험, 실제 해상시운전 및 운항, 데이터 결과 분석을 통하여 연료전지선박에 대한 설계 기법, 시스템 구성 방법, 운항 방법, 향후 발전 방향을 제시한 상당히 가치 있는 중요한 자료들로 구성되어 있습니다. 이런 소중한 자료들이 향후 연료전지선박을 연구하고 개발하는 엔지니어들에게 소중한 기초자료로 활용되어 더욱 효율이 뛰어나고 운용이 편리한 연료전지선박을 개발하는데 많은 도움이 되었으면 하는 바램입니다.

이 논문을 정리하고 완성할 수 있도록 많은 시간 동안 지도하여 주시고 기다려주신 오진석 교수님께 무한한 존경과 감사를 드립니다.

학위과정 동안 지도해주신 유희한 교수님, 이상태 교수님, 이홍찬 교수님께 깊은 감사의 말씀을 올립니다. 부족한 논문을 꼼꼼히 토의해주시고 심사하여 주신 유희한 교수님, 소명옥 교수님, 이상득 교수님, 박준호 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 연구개발에 참여해주신 지경부 관계자, 동남권 관계자, 대경권 관계자, 중소조선연구원 장동원 선임, 전문협력사, (주)금하네이벌텍 기술연구소 연구원 여러분들께 많은 감사를 드립니다. 연료전지선박에 대한 기초자료를 정리하여 제공하여주신 김태운 제독님께 깊은 감사를 드립니다. 바쁜 연구 업무에도 불구하고 어렵고 힘든 시스템 구성 작업 및 시험을 도와준 조관준 박사,

정성영 박사, 김지윤, 이현석, 강영민군 등 E2E 연구실 연구원들께 많은 감사를 전합니다.

항상 걱정을 하시는 부모님, 묵묵히 지켜봐주고 챙겨준 가족들, 잘하고 있느냐고 걱정하며 용기를 전해준 지인 분들께 진심으로 고마운 마음을 전합니다.

